

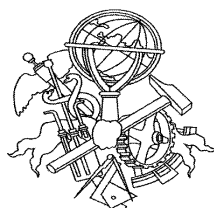
Influência do tipo de adesivo em juntas híbridas soldadas-adesivas

Mestrado em Engenharia Mecânica

Gustavo Pereira Marques

Dissertação submetida para a obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Instituto Superior de Engenharia do Porto
Departamento de Engenharia Mecânica



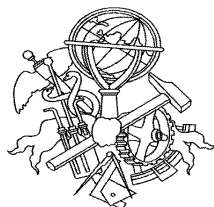
17 de novembro de 2014

Relatório da Unidade Curricular de Dissertação do 2º ano do Mestrado em Engenharia
Mecânica

Candidato: Gustavo Pereira Marques, N°1111613, 111613@isep.ipp.pt
Orientação Científica: Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho, rds@isep.ipp.pt
Co-orientação Científica: Francisco José Gomes da Silva, fgs@isep.ipp.pt

Mestrado em Engenharia Mecânica
Departamento de Engenharia Mecânica

Instituto Superior de Engenharia do Porto



17 de novembro de 2014

...à minha esposa e à minha filha!

Agradecimentos

Este trabalho só foi possível pela colaboração de várias pessoas e instituições, às quais gostaria de apresentar os meus sinceros agradecimentos.

Um agradecimento especial ao meu orientador, o Professor Doutor Raul Campilho, pelo precioso apoio fornecido na parte de simulação numérica, pela sua disponibilidade, pela ajuda prestada na orientação das metodologias adoptadas e na informação partilhada que foi muito útil para a realização deste trabalho.

Ao Professor Doutor Arnaldo Pinto, pela total colaboração, dedicação, compreensão e disponibilidade ao longo de todo o trabalho na realização das juntas, bem como nos ensaios tracção. Ao Professor Francisco Silva pela disponibilidade e ajuda na correcção deste trabalho.

Ao Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), pelos meios disponibilizados para o fabrico dos provetes bem como a realização de ensaios laboratoriais.

Aos meus pais e irmãos, que sempre me apoiaram em todos os momentos.

Resumo

A necessidade de utilizar métodos de ligação entre componentes de forma mais rápida, eficaz e com melhores resultados, tem causado a crescente utilização das juntas adesivas, em detrimento dos métodos tradicionais de ligação tais como a soldadura, brasagem, ligações aparafusadas e rebitadas. A utilização das juntas adesivas tem vindo a aumentar em diversas aplicações industriais por estas apresentarem vantagens das quais se destacam a redução de peso, redução de concentrações de tensões e facilidade de fabrico. No entanto, também apresentam desvantagens, como a necessidade de preparação das juntas e o descentramento da carga aplicada que provoca efeitos de flexão, os quais dão origem a tensões normais na direcção da espessura do adesivo (tensões de arrancamento), afectando assim a resistência da junta. A combinação da ligação adesiva com a soldadura por pontos permite algumas vantagens em comparação com as juntas adesivas tradicionais como a maior resistência, aumento da rigidez, melhor resistência ao corte e arrancamento e também à fadiga.

Neste trabalho é apresentado um estudo experimental e numérico de juntas de sobreposição simples adesivas e híbridas (adesivas-soldadas). Os adesivos utilizados são o Araldite AV138[®], apresentado como sendo frágil, e os adesivos Araldite 2015[®] e Sikaforce[®] 7752, intitulados como adesivos dúcteis. Foram considerados substratos de aço (C45E) em juntas com diferentes comprimentos de sobreposição (L_0), que foram sujeitas a esforços de tracção. Foi realizada uma análise dos valores experimentais e efectuada uma comparação destes valores com os resultados obtidos por Elementos Finitos (EF) no *software* ABAQUS[®], que incluiu uma análise de tensões na camada de adesivo e previsão do comportamento das juntas por Modelos de Dano Coesivo (MDC).

A análise por MDC permitiu obter os modos de rotura, as curvas força-deslocamento e a resistência das juntas com bastante precisão, com excepção das juntas coladas com o adesivo Sikaforce[®] 7752. Estes resultados permitiram validar a técnica de modelação proposta para as juntas coladas e híbridas, o que representa uma base para posterior aplicação desta técnica em projecto, com as vantagens decorrentes da redução do tempo de projecto e maior facilidade de optimização.

Palavras-Chave

Junta de sobreposição simples, adesivo, método de elementos finitos, modelos de dano coesivo.

Abstract

The need to use joining methods between components more quickly, efficiently and with better results, has led to the increasing use of adhesive joints over the traditional joining methods such as welding, brazing, bolting and riveting. The use of adhesive joints has increased in many industrial applications, since they present advantages such as weight reduction, smaller stress concentrations and ease of manufacture. However, they also have disadvantages, such as the necessity of joint preparation and the offset of the applied load that causes bending effects, which give rise to normal stresses in the thickness direction of the adhesive (peel stresses), thereby affecting the strength of the joint. The combination of adhesive bonding with spot welding allows some advantages in comparison with traditional adhesive joints such as increased strength, increased stiffness, better shear and peel strength, and fatigue strength as well.

In this work, an experimental and numerical study of single-lap adhesive and hybrid (adhesive-welded) joints is presented. The adhesives used in the joints are the Araldite AV138[®], regarded as brittle, and the Araldite[®] 2015 and Sikaforce[®] 7752, considered as ductile adhesives. Steel substrates were considered (C45E) in joints with different overlap lengths (L_0), which were subjected to tensile stresses. An analysis of the experimental data was performed and respective comparison with the results obtained by Finite Element (FE) analysis in the software ABAQUS[®], which included a stress analysis in the adhesive layer and strength prediction by Cohesive Zone Models (CZM).

The CZM analysis enabled obtaining the failure modes, the load-displacement curves and the joints strength with high accuracy, with the exception of the bonded joints with Sikaforce[®] 7752. These results allowed to validate the modeling technique proposed for the bonded and hybrid joints, which is a base for further application of this technique in design, with the advantages of reducing the design time and ease of optimization.

Keywords

Single lap joint, adhesive, finite element method, cohesive zone models.

Índice

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE TABELAS	XIII
NOMENCLATURA	XV
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO	1
1.2 OBJECTIVOS	2
1.3 ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO	3
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 TÉCNICAS DE UNIÃO ENTRE COMPONENTES	5
2.1.1 <i>Ligações adesivas</i>	5
2.1.1.1 Vantagens e inconvenientes	7
2.1.1.2 Tipos de esforços mais comuns	8
2.1.1.3 Modos de rotura	11
2.1.2 <i>Ligações soldadas</i>	13
2.1.3 <i>Ligações aparafusadas</i>	14
2.2 CLASSIFICAÇÃO DOS ADESIVOS	15
2.2.1 <i>Caracterização dos adesivos estruturais</i>	17
2.2.2 <i>Tipos de adesivos estruturais</i>	20
2.3 MATERIAIS DE BASE	22
2.4 TÉCNICAS DE PREVISÃO EM JUNTAS ADESIVAS	22
2.4.1 <i>Métodos analíticos</i>	23
2.4.2 <i>Métodos numéricos</i>	26
2.4.2.1 Mecânica dos meios contínuos	27
2.4.2.2 Mecânica da fractura	29
2.4.2.3 Modelos de dano coesivo	30
2.4.2.4 Mecânica do dano	32
2.4.2.5 Método de Elementos Finitos Extendido	34
2.5 JUNTAS HÍBRIDAS	35
2.5.1 <i>Juntas adesivas-soldadas</i>	35
2.5.2 <i>Juntas adesivas-aparafusadas</i>	37
2.5.3 <i>Juntas adesivas-rebitadas</i>	37

2.5.4	<i>Outros tipos de juntas híbridas</i>	38
3	TRABALHO EXPERIMENTAL	40
3.1	MATERIAIS	40
3.1.1	<i>Substratos</i>	41
3.1.2	<i>Adesivos</i>	42
3.1.2.1	Adesivo Araldite® AV138.....	42
3.1.2.2	Adesivo Araldite® 2015.....	44
3.1.2.3	Adesivo Sikaforce® 7752	46
3.2	GEOMETRIAS ESTUDADAS	47
3.2.1	<i>Dimensões e configurações de juntas</i>	47
3.2.2	<i>Fabrico dos provetes</i>	48
3.3	CONDIÇÕES DE ENSAIO.....	51
3.4	RESULTADOS E COMENTÁRIOS DAS JUNTAS.....	52
3.4.1	<i>Modos de rotura das juntas</i>	52
3.4.2	<i>Curvas P-δ</i>	57
4	TRABALHO NUMÉRICO	70
4.1	CONDIÇÕES DA ANÁLISE NUMÉRICA.....	70
4.2	MODELO DE DANO COESIVO	75
4.2.1	<i>Modelo de dano triangular</i>	76
4.2.2	<i>Determinação das propriedades coesivas</i>	76
4.3	ANÁLISE DE TENSÕES	79
4.3.1	<i>Juntas coladas</i>	79
4.3.2	<i>Juntas híbridas</i>	84
4.4	PREVISÃO DE RESISTÊNCIA	89
4.4.1	<i>Juntas com Araldite® AV138</i>	89
4.4.2	<i>Juntas com Araldite® 2015</i>	91
4.4.3	<i>Juntas com Sikaforce® 7752</i>	92
4.4.4	<i>Discussão de resultados</i>	94
5	CONCLUSÕES	97
	REFERÊNCIAS DOCUMENTAIS	100

Índice de Figuras

Figura 1 - Ilustração esquemática das dimensões da junta colada segundo a norma ASTM D1002 [2].	6
Figura 2 - Efeito “flexão” de uma junta de sobreposição simples, quando sujeita a tracção uniaxial.	6
Figura 3 - Distribuição de tensões numa junta de topo sob carga axial e não-axial [9].	9
Figura 4 - Distribuição de tensões numa junta adesiva quando sujeita a corte e clivagem ou arrancamento.	10
Figura 5 - Esforços de clivagem (a)	11
Figura 6 - Distribuição das tensões de clivagem e de arrancamento.	11
Figura 7 - Representação esquemática dos diferentes modos de rotura em juntas coladas de sobreposição simples [7].	12
Figura 8 - Representação esquemática de um ponto efectuado pelo método de soldadura por resistência.	13
Figura 9 - Ligação parafusada com placa de reforço simples a) com vista em corte em b), e ligação dupla c) com vista em corte em d)	15
Figura 10 - Equipamento para aplicação de adesivo: a) seringa, b) pistola manual e c) pistola pneumática.	21
Figura 11 - Distribuição das tensões de corte no adesivo pelo modelo de Volkersen.	24
Figura 12 - Distribuição das tensões de arrancamento no adesivo pelo modelo de Goland e Reissner.	25
Figura 13 - Plasticidade no adesivo de acordo com Hart-Smith.	26
Figura 14 - Juntas com ângulos de arredondamento diferentes [24].	28
Figura 15 - Distribuição das tensões de arrancamento no adesivo sujeito a uma carga de 2kN [24].	29
Figura 16 - Lei Modelo de Dano Coesivo (MDC) triangular.	31
Figura 17 - Processo de rotura das JSS; (a) esquema de rotura obtida numericamente; (b) rotura no adesivo obtida experimentalmente por Chen et al [43].	33
Figura 18 - Processo ligação de juntas adesivas-soldadas [52].	36
Figura 19 - Representação esquemática de uma ligação adesiva-aparafusada.	37
Figura 20 - Configuração esquemática de uma junta de sobreposição simples adesiva-rebitada. ...	38
Figura 21 - Imagem em corte de uma junta adesiva- <i>clinch</i> [57].	39
Figura 22 - Curvas σ - ε do aço DIN C45E.	41
Figura 23 - Rotura similar nos 5 provetes submetidos ao ensaio de tracção.	42
Figura 24 - Curvas σ - ε de provetes maciços de Araldite® AV138 [59].	43
Figura 25 - Curvas σ - ε de provetes maciços de Araldite® 2015.	45

Figura 26 - Curvas σ - ϵ de provetes maciços de Sikaforce® 7752.....	46
Figura 27 - Dimensões e geometria da junta de sobreposição simples.	48
Figura 28 - Granalhadora CIDBLAST, modelo RT6S.....	49
Figura 29 - Aplicação do fio calibrado de 0,2 mm.....	50
Figura 30 - Juntas híbridas após fabrico pelo método <i>weld-through</i>	50
Figura 31 - Máquina de ensaios Shimadzu AG-X 100 e fixação do provete.	51
Figura 32 - Máquina soldadura por pontos CEA® NKLT-28.....	52
Figura 33 - Superfícies de rotura com uma junta adesiva de Araldite® AV138 (a), uma junta adesiva de Sikaforce® 7752 (b), uma junta híbrida de Araldite® AV138 (c), uma junta híbrida de Sikaforce® 7752 (d) e uma junta soldada (e).....	53
Figura 34 - Superfícies de rotura dos provetes com $L0 = 15$ mm para o adesivo Araldite® AV138 (juntas coladas).....	54
Figura 35 - Superfícies de rotura dos provetes com $L0 = 30$ mm para o adesivo Sikaforce® 7752 (juntas coladas).....	55
Figura 36 - Superfícies de rotura dos provetes com $L0 = 30$ mm para o adesivo Araldite® AV138 (juntas híbridas).....	56
Figura 37 - Superfícies de rotura dos provetes com $L0 = 30$ mm para o adesivo Sikaforce® 7752 (juntas híbridas).....	57
Figura 38 - Curvas P - δ obtidas experimentalmente utilizando o adesivo Araldite® AV138, para ligações coladas com $L0 = 15$ mm e $L0 = 30$ mm.	58
Figura 39 - Curvas P - δ obtidas experimentalmente utilizando o adesivo Araldite® 2015, para ligações coladas com $L0 = 15$ mm e $L0 = 30$ mm.	59
Figura 40 - Curvas P - δ obtidas experimentalmente utilizando o adesivo Sikaforce® 7752, para ligações coladas com $L0 = 15$ mm e $L0 = 30$ mm.	60
Figura 41 - Curvas P - δ obtidas experimentalmente utilizando soldadura por pontos.	62
Figura 42 - Curvas P - δ obtidas experimentalmente utilizando o adesivo Araldite® AV138, para ligações híbridas com $L0 = 15$ mm e $L0 = 30$ mm.	63
Figura 43 - Curvas P - δ obtidas experimentalmente utilizando o adesivo Araldite® 2015, para ligações híbridas com $L0 = 15$ mm e $L0 = 30$ mm.....	64
Figura 44 - Curvas P - δ obtidas experimentalmente utilizando o adesivo Sikaforce® 7752, para ligações híbridas com $L0 = 15$ mm e $L0 = 30$ mm.	65
Figura 45 - Valores experimentais de $P_{m\acute{a}x}$ média para a configuração $L0 = 15$ mm.	67
Figura 46 - Valores experimentais de $P_{m\acute{a}x}$ média para a configuração $L0 = 30$ mm.	68
Figura 47 - Detalhe da malha na zona de ligação para os modelos de junta adesiva a) e junta híbrida b), ambos com $L0 = 15$ mm.....	70
Figura 48 - Condições fronteira e de carregamento impostas nos modelos numéricos.....	71
Figura 49 - Pormenor das direcções do refinamento da malha na zona do adesivo (juntas adesivas).	74
Figura 50 - Pormenor da direcção do refinamento da malha na zona do adesivo e no ponto de soldadura (juntas híbridas).	75

Figura 51 - Distribuição de tensões σ_y a meio da espessura do adesivo em função de $L0$ para as juntas coladas (Araldite® AV138).	80
Figura 52 - Distribuição de tensões σ_y a meio da espessura do adesivo em função de $L0$ para as juntas coladas (Araldite® 2015).	80
Figura 53 - Distribuição de tensões σ_y a meio da espessura do adesivo em função de $L0$ para as juntas coladas (Sikaforce® 7752).	81
Figura 54 - Distribuição de tensões τ_{xy} a meio da espessura do adesivo em função de $L0$ para as juntas coladas (Araldite® AV138).	82
Figura 55 - Distribuição de tensões τ_{xy} a meio da espessura do adesivo em função de $L0$ para as juntas coladas (Araldite® 2015).	82
Figura 56 - Distribuição de tensões τ_{xy} a meio da espessura do adesivo em função de $L0$ para as juntas coladas (Sikaforce® 7752).	83
Figura 57 - Distribuição de tensões σ_y a meio da espessura do adesivo em função de $L0$ para as juntas híbridas (Araldite® AV138).	84
Figura 58 - Distribuição de tensões σ_y a meio da espessura do adesivo em função de $L0$ para as juntas híbridas (Araldite® 2015).	85
Figura 59 - Distribuição de tensões σ_y a meio da espessura do adesivo em função de $L0$ para as juntas híbridas (Sikaforce® 7752).	85
Figura 60 - Distribuição de tensões τ_{xy} a meio da espessura do adesivo em função de $L0$ para as juntas híbridas (Araldite® AV138).	87
Figura 61 - Distribuição de tensões τ_{xy} a meio da espessura do adesivo em função de $L0$ para as juntas híbridas (Araldite® 2015).	87
Figura 62 - Distribuição de tensões τ_{xy} a meio da espessura do adesivo em função de $L0$ para as juntas híbridas (Sikaforce® 7752).	88
Figura 63 - Comparação dos resultados experimentais de $P_{m\acute{a}x}$ com os resultados obtidos pelo MEF para as juntas coladas e juntas híbridas com o adesivo Araldite® AV138 para diferentes $L0$.	90
Figura 64 - Comparação dos resultados experimentais de $P_{m\acute{a}x}$ com os resultados obtidos pelo MEF para as juntas coladas e juntas híbridas com o adesivo Araldite® 2015 para diferentes $L0$.	91
Figura 65 - Comparação dos resultados experimentais de $P_{m\acute{a}x}$ com os resultados obtidos pelo MEF para as juntas coladas e juntas híbridas com o adesivo Sikaforce® 7752 para diferentes $L0$.	93

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Classificação dos adesivos [13].	16
Tabela 2 - Desenvolvimento cronológico dos adesivos.	19
Tabela 3 - Propriedades do adesivo Araldite® AV138 [59].	44
Tabela 4 - Propriedades do adesivo Araldite® 2015 [38, 60].	45
Tabela 5 - Propriedades do adesivo Sikaforce 7752® [61].	47
Tabela 6 - Variação de $P_{máx}$ dos três adesivos para diferentes valores de L_0 .	61
Tabela 7 - Variação de $P_{máx}$ dos três adesivos para L_0 diferentes, comparando entre juntas coladas e juntas híbridas.	67
Tabela 8 - Variação do número de elementos da malha nas juntas adesivas.	72
Tabela 9 - Variação do número de elementos da malha nas juntas híbridas.	73
Tabela 10 - Parâmetros coesivos em tracção e corte para uma camada de adesivo de Araldite® 2015 com uma espessura de 0,2 mm.	77
Tabela 11 - Parâmetros coesivos em tracção e corte para uma camada de adesivo Araldite® AV138 com uma espessura de 0,2 mm.	78
Tabela 12 - Parâmetros coesivos em tracção e corte para uma camada de adesivo Sikaforce® 7752 com uma espessura de 0,2 mm.	79

Nomenclatura

Caracteres Romanos

E – Módulo de *Young*

G – Módulo de corte

G_{IC} – Tenacidade à tracção

G_{IIC} – Tenacidade ao corte

G_c – Resistência à fractura

t – Tensão

t_m^0 – Resistência máxima em modo misto

t_n^0 – Resistência máxima em tracção

t_n – Componente de tensão normal

t_s – Componente de tensão ao corte

t_s^0 – Resistência máxima em corte

L_t – Comprimento entre amarras

t_A – Espessura do adesivo

t_s – Espessura do substrato

w – Largura do substrato

L_0 – Comprimento de sobreposição

Caracteres Gregos

ε_r - Deformação de rotura

ν - Coeficiente de *Poisson*

δ - Deslocamento

δ_m^f - Deslocamento de rotura em modo misto

ε - Extensão

τ_{avg} - Tensão de corte média

τ_{xy} - Tensões de corte

σ - Tensão

$\sigma_{m\acute{a}x}$ - Tensão principal máxima

σ_{rot} - Tensão de rotura

σ_y - Tensões de arrancamento

Abreviaturas

EF - Elementos Finitos

MDC - Modelo de Dano Coesivo

PVA - Adesivos poliacetato de vinilo

MEF - Método Elemento Finitos

2D - Duas dimensões

3D - Três dimensões

MMF - *Mixed-Mode Flexure*

JSS - Junta de sobreposição simples

MEFX - Método de Elementos Finitos Extendido

TAST - *Thick adherend shear test*

SDEG - *Stiffness degradation*

DCB - *Double cantilever beam*

ENF - *End-notched flexure*

Tabs - Calços colados na junta

1 Introdução

1.1 Contextualização

A ligação entre componentes é geralmente feita por uniões mecânicas, soldadas ou adesivas. A ligação com adesivos é uma das técnicas hoje em dia mais divulgadas para estruturas com alto desempenho e margens de erro nulas (indústria aeronáutica, aeroespacial, automóvel, entre outras) pois oferece uma distribuição de tensões mais uniforme (aumento da área de contacto), uma vez que não são necessários furos ou superfícies soldadas. O aumento da resistência, o melhor comportamento à fadiga, a redução de peso e a resistência à corrosão, são algumas vantagens que este tipo de junta oferece comparativamente às uniões tradicionais. Contudo, a concentração de tensões nas extremidades da junta devido à deformação diferencial dos substratos na zona da sobreposição, e também os desalinhamentos de esforços, apresentam-se como as principais desvantagens das juntas adesivas.

A técnica de ligação híbrida combina a ligação adesiva com outras técnicas de união (aparafusadas, rebitadas e soldadas), e tem sido considerada para melhorar a resistência das juntas quando estas estão sujeitas a esforços estáticos ou à fadiga.

Considerando as juntas adesivas-soldadas, o aumento da resistência mecânica tornou possível a diminuição na espessura dos substratos a serem ligados, enquanto outras vantagens são o isolamento acústico, absorção de vibrações e também uma melhor transmissão de esforços na zona interna da ligação. A ideia é que, quando o adesivo falhar, a ligação soldada poderia manter a ligação intacta por um período adicional de tempo de forma a evitar uma falha catastrófica. Este processo híbrido de ligação é utilizado para maximizar os benefícios de ambos os processos de ligação.

Devido à crescente utilização destas juntas híbridas, a existência de métodos numéricos capazes de prever a resistência das juntas com elevada precisão pode levar a uma poupança

de recursos, de tempo na análise da resistência destas e na selecção do adesivo mais adequado para uma dada aplicação.

1.2 Objectivos

Este trabalho teve como principais objectivos o estudo comparativo entre as técnicas de união convencionais por adesivos ou soldadura por pontos, e técnica de união adesiva-soldada. Pretende-se também compreender a influência do ponto de soldadura na resistência da ligação, bem como averiguar a capacidade dos MDC na precisão de resistência destas juntas. É utilizada neste estudo a junta de sobreposição simples, tanto para a análise numérica com para a experimental, devido à sua simplicidade. O estudo do desempenho dos adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752 avaliados em junta de sobreposição simples (JSS) com quatro valores de L_0 permitiu a avaliação da resistência da junta, bem como para a avaliação do comportamento dos adesivos nas diversas condições. Foi feita uma comparação de resultados a partir das curvas $P-\delta$, modos de rotura e resistência das juntas. Os resultados experimentais foram comparados com análises numéricas detalhadas por EF, baseadas em MDC. Foi ainda realizada uma análise das tensões de arrancamento e de corte na camada adesiva e analisadas as variações e a influência destas na resistência da junta adesiva. No estudo por MDC, os modelos basearam-se numa relação linear entre tensões e deslocamentos de forma a simular o comportamento elástico do material até à resistência máxima e subsequentemente degradação das propriedades dos materiais até à rotura. Com a realização destas análises vai ser possível estimar capacidade desta técnica para avaliar o desempenho das juntas adesivas e juntas adesivas-soldadas sem ter a necessidade de realizar ensaios experimentais para prever qual o seu comportamento, e ainda averiguar qual o adesivo mais adequado em função de L_0 .

1.3 Organização do relatório

Neste primeiro capítulo é enquadrado o tema abordado nesta dissertação, são definidos os objectivos do trabalho, descrita a estrutura e tópicos abordados nesta dissertação.

No capítulo 2 definem-se conceitos fundamentais sobre os temas abordados no contexto das ligações adesivas, tais como as suas propriedades, vantagens e desvantagens das juntas adesivas. São discutidos os tipos de adesivos, diferentes formas de os classificar, os esforços mais comuns e os modos de rotura de uma ligação adesiva. Caracterizam-se ainda as técnicas mais comuns de análise da resistência para juntas adesivas.

No capítulo 3, relativa à parte experimental realizada, apresentam-se as propriedades dos materiais (substratos e adesivos) mais importantes. As referidas propriedades são referentes a trabalhos anteriores, com excepção do aço. É também feita uma abordagem sobre as configurações de junta a ser testada, bem como todo o procedimento realizado para o fabrico dos mesmos. São definidas as condições de ensaio utilizadas para a realização dos ensaios à tracção dos provetes e também os parâmetros na máquina de soldadura por pontos para o fabrico das juntas híbridas.

De seguida apresentam-se os modos de rotura das juntas com as várias configurações de ligação, explicando com mais detalhe todo o processo envolvente. Referem-se também as curvas $P-\delta$ para todas as configurações, incluindo os três adesivos. Realizou-se uma comparação entre a resistência máxima obtida para as juntas coladas e as juntas híbridas, discutindo a influência das propriedades do adesivo para as várias configurações.

No capítulo 4, referente ao trabalho numérico levado a cabo, é efectuada uma abordagem das condições de análise numérica impostas no *software* ABAQUS® para o método MDC e realizada uma análise de tensões de corte e de arrancamento das juntas para os diferentes adesivos e valores de L_0 usados. Esta análise de tensões permitirá discussão mais aprofundada dos comportamentos de resistência obtidos para as várias configurações de junta, incluindo a disposição colada e híbrida, bem como para os 3 adesivos.

No último capítulo, o capítulo 5, são apresentadas as conclusões retiradas de todo o trabalho e feita referência a possíveis trabalhos futuros.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Técnicas de união entre componentes

Existem diversos tipos de uniões possíveis de considerar entre dois ou mais componentes, ligações estas que podem ser feitas entre materiais similares e dissimilares. Embora existam métodos menos utilizados, as técnicas descritas abaixo são as mais utilizadas na indústria em geral.

2.1.1 Ligações adesivas

A ligação com recurso a adesivos, designada usualmente por junta adesiva, é um método frequente na união de dois ou mais componentes e, em comparação com as ligações E

Assim como qualquer outro método de ligação, o projecto de juntas adesivas, apesar de parecer simples, requer cuidados especiais, tais como uma selecção adequada do tipo de adesivo a usar e uma selecção da geometria da junta, tendo em consideração o tipo de solicitação. É também necessário garantir uma boa adesão entre o adesivo e os substratos, evitando assim uma rotura prematura.

As juntas adesivas consistem na ligação de substratos através de um adesivo, cuja cura leva à criação de uma ligação rígida. A caracterização de um adesivo estrutural pode ser efectuada através da realização de testes sobre juntas de sobreposição simples, apresentando este ensaio várias dificuldades derivadas da fina espessura de camada de adesivo e de componentes de tensão indesejadas, como por exemplo, as tensões de arrancamento nas extremidades da sobreposição [1]. A pequena espessura de camada de adesivo comparativamente à elevada espessura de substrato tem como finalidade minimizar deformações de flexão e tensões de clivagem que podem ocorrer no ensaio. A distribuição

de tensões de corte ao longo do adesivo é mais uniforme para valores de comprimento de sobreposição (L_0) pequenos. À medida que L_0 aumenta, observa-se um aumento gradual dos gradientes de tensões de corte desde o centro da junta até às suas extremidades. Devido principalmente a este facto, a resistência das juntas não aumenta proporcionalmente com L_0 , com uma maior diferença a ser observada para as juntas coladas com adesivos frágeis, que não permitem plastificação. Segundo a norma ASTM D 1002 [2], o ensaio de sobreposição simples representado na Figura 1 mede apenas um valor comparativo de tensão de rotura, pois não permite medir a verdadeira resistência ao corte do adesivo (a tensão de corte não é constante ao longo da ligação e são desprezados os efeitos de arrancamento).

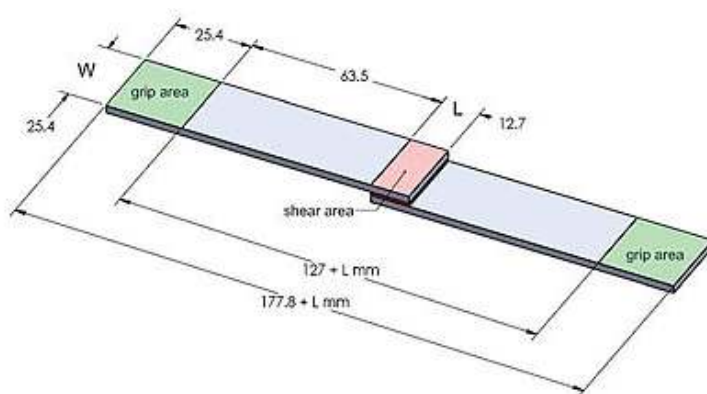


Figura 1 - Ilustração esquemática das dimensões da junta colada segundo a norma ASTM D1002 [2].

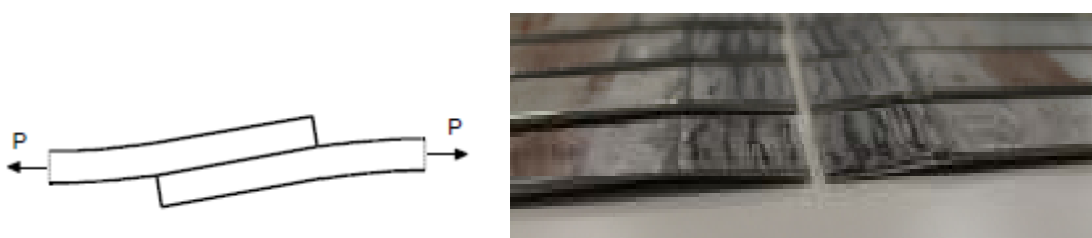


Figura 2 - Efeito “flexão” de uma junta de sobreposição simples, quando sujeita a tracção uniaxial.

O desalinhamento das juntas produz esforços na camada adesiva para além do corte, da mesma forma que um pequeno desalinhamento no carregamento pode causar grandes concentrações de tensões na junta. Para a obtenção das propriedades mecânicas dos adesivos, os ensaios devem ser efectuados com substratos maciços. Segundo a norma ASTM D 5656

[3] a resistência ao corte pode ser obtida pelo ensaio designado por *Thick-Adherend Shear Test* (TAST) [4 - 6].

A adesão entre o adesivo e os substratos é um dos aspectos mais importantes na resistência de uma junta adesiva, e para que esta seja bem-sucedida é necessário fazer uma preparação cuidadosa das superfícies, uma remoção total de quaisquer partículas presentes nos aderentes, uma selecção rigorosa do adesivo e do aderente de acordo com as suas propriedades. Uma forma de melhorar a adesão é modificar a superfície do substrato com recurso a um tratamento superficial, como por exemplo o processo de anodização do alumínio [7].

A resistência de uma junta colada depende de muitos factores difíceis de quantificar, como o L_0 , a cedência dos substratos, a plasticidade do adesivo, a espessura de adesivo e as condições ambientais a que a junta está sujeita, nomeadamente a temperatura e a humidade relativa [8].

2.1.1.1 Vantagens e inconvenientes

As características dos adesivos poliméricos ditos estruturais permitem a utilização crescente de juntas coladas primárias, isto é, de juntas cujo desempenho é crítico para a integridade da estrutura em que se inserem. Entre as principais vantagens das juntas coladas, podemos citar [9]:

- A elevada resistência mecânica, se a junta for bem concebida;
- Economia de peso e no número de peças em relação às ligações aparafusadas e rebitadas;
- Minimização de problemas de corrosão, sobretudo nas ligações de materiais diferentes;
- Capacidade de vedação e de isolamento térmico;
- Amortecimento de vibrações, devido ao comportamento viscoelástico dos adesivos;
- Boa resistência à fadiga, para a qual contribuem fortemente a ausência de furos e o respectivo efeito de concentração de tensões;
- Boa aparência estética.

Uma das principais limitações da maioria das ligações adesivas reside nos pré-tratamentos, por vezes complexos, morosos e dispendiosos, que são necessários realizar para garantir uma

boa adesão e durabilidade da ligação. No entanto, existem adesivos capazes de colar materiais sem recorrer a uma preparação muito cuidada bastando, por exemplo, uma simples limpeza com acetona ou álcool. Outra desvantagem frequentemente atribuída aos adesivos é a morosidade da cura. De facto, alguns adesivos podem demorar bastante tempo até completarem o processo de endurecimento, mas em muitas aplicações é possível utilizar adesivos de cura rápida. Contudo, podem-se ainda encontrar outras limitações, das quais se destacam [9]:

- Sensibilidade a cargas de clivagem e arrancamento;
- Algumas dificuldades na inspecção;
- Impossibilidade de desmontagem sem destruição da junta;
- Sensibilidade à exposição ambiental (temperatura, humidade, radiação UV, etc.) e à fluência [4,7].

2.1.1.2 Tipos de esforços mais comuns

O tipo de esforços e distribuições de tensões no adesivo de uma junta adesiva estão directamente correlacionados com o tipo de solicitação a que as juntas estão sujeitas.

O principal objectivo no projecto de uma junta colada é que o adesivo esteja submetido preferencialmente a esforços ao corte. As solicitações de clivagem e arrancamento são altamente prejudiciais. Nos ensaios de tracção deve-se ter especial atenção, pois desalinhamentos na colagem das juntas provocam esforços de clivagem. De destacar contudo que, nas juntas de sobreposição sujeitas à tracção, as tensões de clivagem estão presentes com mais intensidade quando temos grandes L_0 . Os tipos de esforços mais comuns em camadas de adesivo são:

- Tracção;
- Compressão;
- Corte;
- Arrancamento (*peel*);
- Clivagem (*cleavage*).

Tracção e compressão

Este tipo de carregamento surge quando as forças que actuam sobre a junta são perpendiculares a esta e quando as tensões estão uniformemente distribuídas em toda a sua superfície. Devido às forças não serem rigorosamente axiais (Figura 3) e à junta não ser uniforme, são geradas tensões de clivagem e arrancamento indesejadas. Nas extremidades da junta desenvolvem-se regiões de elevada tensão comparativamente ao centro da junta. Isto leva a que uma fenda na extremidade, por mínima que seja, tenha tendência a propagar-se rapidamente e levar à rotura total da ligação. Contudo, se a junta for projectada/dimensionada correctamente, os resultados vão ser substancialmente melhores, pois a carga está com distribuição de tensão mais proporcional.

O carregamento à compressão designa-se como o esforço que comprime um substrato contra o outro. A distribuição das tensões pelo adesivo é constante, tal como acontece para a tracção. Na verdade, uma ligação quando sujeita a compressão pura, não precisa de adesivo para as unir [1, 7, 9].

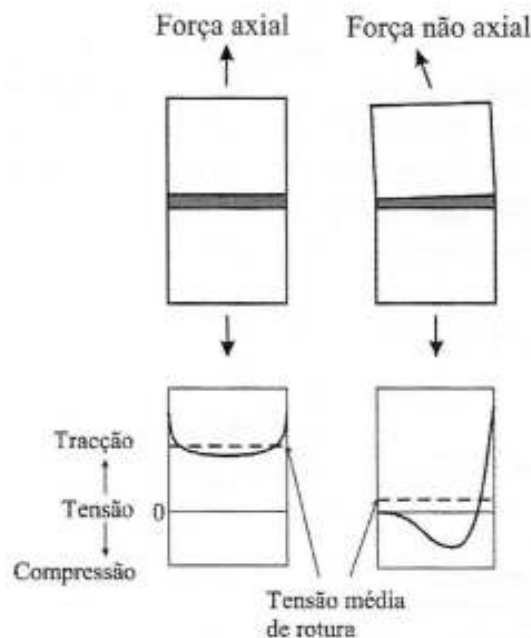


Figura 3 - Distribuição de tensões numa junta de topo sob carga axial e não-axial [9].

Corte

Esta solicitação ocorre quando as forças que actuam no plano do adesivo tentam separar os substratos. As ligações que estão apenas dependentes do adesivo, ou seja, nas quais os substratos não têm influência mecânica na ligação, são relativamente simples de ser coladas e são geralmente as mais utilizadas na prática. As juntas adesivas cujos carregamentos induzem esforços maioritariamente de corte apresentam uma resistência mais elevada, pois toda a área de ligação contribui para a resistência da junta e, por outro lado, a facilidade de alinhar os substratos é um ponto a favor, comparativamente com o ensaio à tracção.

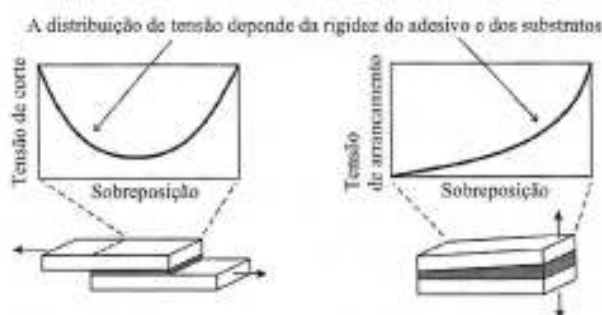


Figura 4 - Distribuição de tensões numa junta adesiva quando sujeita a corte e clivagem ou arrancamento [9].

A Figura 4 mostra que a maior parte das tensões de corte da junta está localizada nas extremidades de sobreposição. O centro da junta contribui pouco para a resistência da junta. Segundo Petrie [1], dependendo da geometria da junta e das propriedades físicas do adesivo e dos aderentes, duas faixas de adesivo em cada extremidade da junta podem proporcionar a mesma força de ligação, como quando toda a área de sobreposição é ligada com adesivo.

Clivagem e arrancamento

Como mostra a Figura 5, os esforços de clivagem e arrancamento são indesejáveis em juntas coladas e, como tal, deve-se sempre que possível configurar a junta para que esta esteja sujeita principalmente a esforços de corte. Contudo, este princípio não é tido em consideração na ligação de juntas de sobreposição simples já que, quando sujeitas a esforços de tracção, as tensões de arrancamento acentuam-se nas extremidades da ligação (Figura 6), prejudicando a resistência da junta.

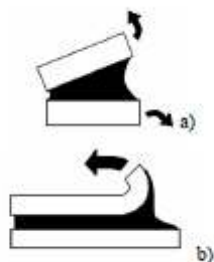


Figura 5 - Esforços de clivagem (a) e de arrancamento (b) [9].

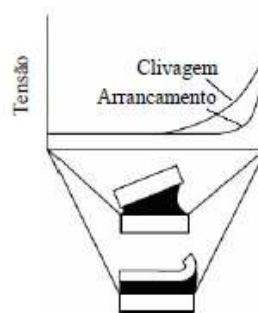


Figura 6 - Distribuição das tensões de clivagem e de arrancamento [9].

As juntas apresentam diferentes comportamentos, em função das propriedades dos adesivos utilizados. Enquanto os adesivos frágeis e rígidos são particularmente sensíveis aos esforços de arrancamento, os adesivos dúcteis permitem uma plastificação do adesivo nas extremidades da ligação, transmitindo também os esforços para a zona interior do adesivo, o que leva a uma maior resistência da junta [1, 7, 9, 10].

Segundo da Silva et al. [9], os adesivos epóxicos rígidos têm uma resistência ao arrancamento próxima de 0,35 N/mm, enquanto os adesivos mais tenazes podem chegar aos 4-8 N/mm, o que ilustra a diferença de comportamento referida anteriormente.

2.1.1.3 Modos de rotura

A rotura de uma junta está relacionada com o modo de preparação das superfícies, sendo que uma preparação inadequada pode conduzir à fragilização da ligação entre adesivo e aderentes e, como tal, comprometer a resistência da mesma. Para melhorar a ligação pretende-se que a rugosidade das superfícies seja elevada, de forma a promover o contacto mecânico, garantir que as superfícies a serem coladas não tenham resíduos (pós, limalhas, partículas) e também que a espessura de camada de adesivo esteja no intervalo óptimo, geralmente entre 0,1 e 0,3 mm [11].

A rotura das juntas pode dar-se de 4 formas (Figura 7):

- Rotura adesiva;

- Rotura coesiva;
- Rotura pelo substrato;
- Rotura mista.

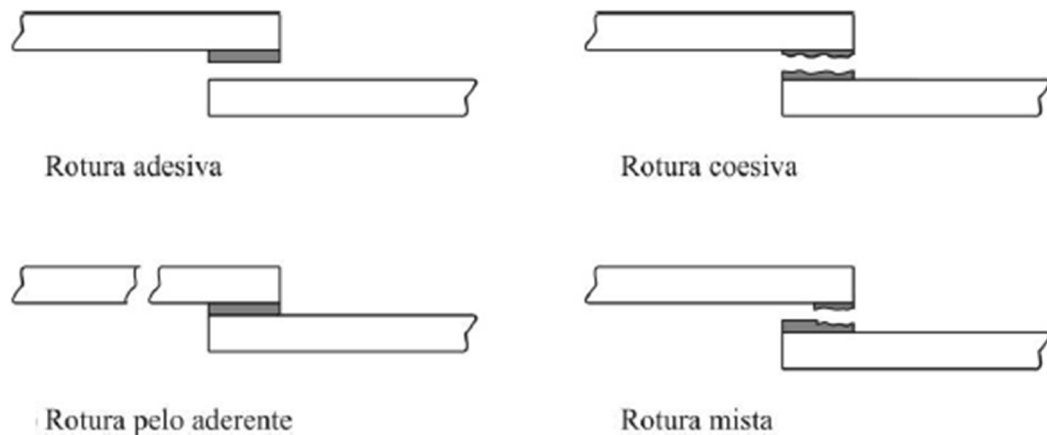


Figura 7 - Representação esquemática dos diferentes modos de rotura em juntas coladas de sobreposição simples [7].

- Rotura adesiva – rotura que ocorre na interface entre o aderente e o adesivo e por norma está relacionada com uma má preparação da superfície. Após rotura, observa-se que uma das superfícies dos substratos em contacto com o adesivo não contém qualquer resíduo de adesivo, o qual fica depositado na sua totalidade na outra superfície. Esta separação deve-se a uma falha na adesão entre o adesivo e a superfície do substrato.
- Rotura coesiva – A rotura coesiva ocorre quando a ligação entre o adesivo e o substrato é mais forte do que a resistência interna do próprio adesivo. Neste caso, as superfícies de rotura estão ambas cobertas por adesivo.
- Rotura pelo aderente – este modo de rotura ocorre quando a resistência do adesivo é superior à resistência do aderente à tracção, que deve ser sempre o objectivo final de uma ligação adesiva.

- Rotura mista – descreve-se como um modo de rotura que combina características de uma rotura adesiva e de uma rotura coesiva. A sua rotura ocorre na zona de ligação entre o adesivo e o substrato e no interior do próprio adesivo. A sua origem pode estar numa não limpeza ou numa limpeza ineficaz de uma determinada secção das superfícies a ligar [7].

2.1.2 Ligações soldadas

Existem diversas configurações de juntas soldadas. Para a ligação de chapas finas sobrepostas, o método mais relevante é a soldadura por pontos. Este processo, que consiste na união de chapas finas através de um ou mais pontos sobre os quais são aplicados calor e pressão; calor este gerado pela resistência eléctrica que passa através dos substratos mantidos em contacto durante um determinado período de tempo (Figura 8). Este processo utiliza baixa tensão, elevada intensidade de corrente e pressão.

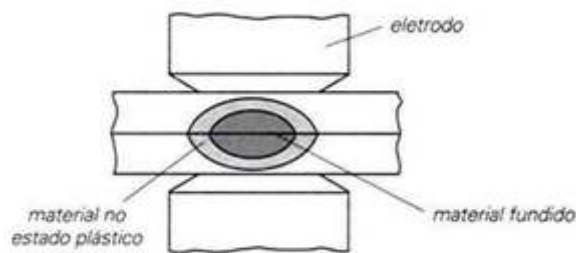


Figura 8 - Representação esquemática de um ponto efectuado pelo método de soldadura por resistência.

A área de contacto dos eléctrodos sobre os substratos é um dos factores que deve ser tido em conta, com o intuito de minimizar a discrepância nos resultados finais obtidos. Do ponto de vista industrial, a soldadura por pontos é utilizada em diversas aplicações devido à sua rapidez e versatilidade. Contudo, existem também limitações associadas a este processo. Apresentam-se em seguida vantagens e desvantagens deste processo comparativamente às juntas coladas.

Vantagens:

- Custo, em geral, razoável;

- Rapidez do processo;
- Requer poucos recursos humanos e logísticos;
- Resistência de ligação elevada.

Desvantagens:

- Baixa resistência à fadiga;
- Custo do equipamento elevado;
- Não proporciona barreira acústica;
- A dissipação de energia é baixa/nula;
- Zona termicamente afectada.

2.1.3 Ligações aparafusadas

As ligações aparafusadas são o tipo de ligação mais utilizado pelo facto de haver um maior estudo sobre o seu comportamento. As ligações coladas estão em desvantagem neste aspecto por ainda não haver um conhecimento alargado sobre o seu funcionamento a longo prazo e a condições ambientais adversas.

As ligações aparafusadas apresentam desvantagens relativamente às juntas coladas relacionadas com a execução da furação, a corrosão entre superfícies de contacto, a concentração de tensões localizada em redor do furo, a possibilidade de desaperto em funcionamento devido a vibrações, a necessidade de esconder a cabeça do parafuso e/ou porca, pois estorvam no deslizamento entre superfícies e com o acréscimo de peso, mas por outro lado podem unir uma vasta panóplia de materiais com características iguais ou até diferentes.

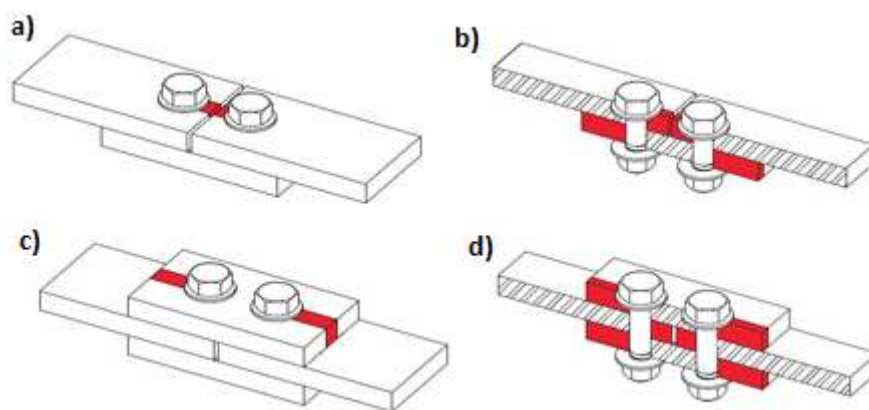


Figura 9 - Ligação parafusada com placa de reforço simples a) com vista em corte em b), e ligação dupla c) com vista em corte em d).

A montagem com parafusos é o método ideal quando é necessária uma desmontagem frequente e fácil. A Figura 9 mostra duas configurações típicas, que permitem a montagem e desmontagem frequente e fácil. Normalmente, é um método seguro e confiável. Contudo, sob algumas circunstâncias, os parafusos podem desapertar diminuindo a qualidade da ligação. Além disso, a utilização de parafusos enfraquece as peças, devido aos furos necessários ao processo. De facto, ocorrem concentrações de tensões perto dos furos quando a montagem está sob carga, o que pode provocar a fadiga prematura do material.

2.2 Classificação dos adesivos

Os critérios mais importantes para classificação dos adesivos são, dependendo da aplicação e segundo a bibliografia consultada, a resistência, o ambiente circundante, o tipo de aderente em que podem ser utilizados, custos, desempenho ou função, composição química e família em quais estão inseridos, entre outros [9]. Para dimensionar uma junta é necessário conhecer as propriedades do adesivo de forma a garantir que o nível de tensão no adesivo não excede a sua resistência. Depois de se conhecer o tipo de adesivo e material a ligar, deve-se preparar a superfície de modo a garantir uma boa adesão.

Uma divisão possível dos adesivos é aquela que separa os adesivos naturais dos sintéticos (Tabela 1). Os adesivos sintéticos são produzidos a partir de materiais trabalhados pelo homem, tais como polímeros. Os adesivos naturais, como o próprio nome indica, provêm de

matérias naturais, tais como subprodutos animais ou de agricultura, resina natural, entre outros [7, 9, 12].

Os adesivos naturais podem ainda ser divididos em adesivos de origem animal, vegetal ou mineral [1]. As colas que provêm de origem animal, em geral, baseiam-se na proteína colagénio, retirada de mamíferos, peixes ou leite. Estas colas têm uma elevada viscosidade que é útil para quando necessitamos de uma ligação em posição vertical.

As ligações mais comuns feitas a partir de colas vegetais são à base de amido ou celulose. O amido em estado natural, dissolvido em água, pode ser usado para o fabrico de pastas de papel; mais recentemente, o amido dissolvido/modificado é bastante utilizado para o fabrico de colas utilizadas em envelopes por exemplo.

Os adesivos minerais tem como base os silicatos e fosfatos, tendo como base de ligação as altas temperaturas necessárias para a união, como por exemplo betume e asfalto.

Os adesivos sintéticos podem ser divididos em (pela composição química): elastómeros, termoplásticos e termoendurecíveis. Pela combinação de dois ou mais destes tipos de adesivos obtém-se um adesivo híbrido.

Tabela 1 - Classificação dos adesivos [13].

Origem	Tipo básico	Material adesivo	
Natural	Animal	Albumina	Cola animal, caseína, goma-laca, cera de abelha.
	Vegetal	Resinas naturais	(goma arábica, colofónia, etc.); óleos e graxas (cera de carnaúba, óleo de linhaça); proteínas (soja); carboidratos (amido, dextrinas).
	Mineral	Materiais inorgânicos	(silicatos, magnésia, fosfatos, enxofre); graxas minerais (parafina), resinas minerais (copal, âmbar); betume.
Sintéticos	Elastómeros	Borracha natural	Borracha clorada, borracha ciclizada, borracha hidro clorada

	Termoplásticos	Borracha sintética e derivados	Butil, poliisobutileno, misturas de polibutadieno (estireno e acrilonitrila), polisoprenos, policloroprenos, silicone, poliuretanos, polisulfetos, poliolefinas (cloreto vinil etileno, etileno propileno)
		Derivados da celulose	Acetato, acetato-butirato, caprato, nitrato, metil celulose, etil hidroxi celulose, carboxi metil celulose
		Polímeros vinil e copolímeros	Polivinil-acetato, álcool, acetal, cloreto, cloreto polivinilideno, éteres alquil polivinil
		Poliésteres (saturados) Poliacrilatos	Poliestireno, poliamidas (nylon e modificações), (metilacrilatos e polímeros acrilatos, ciano-acrilatos, acrilamida)
		Poliéteres	(Éter e polihidroxi, éteres polifenólicos)
	Termoendurecíveis	Amino plásticos	(Uréia e formaldeídos melanina e modificações)
		Epóxidos e modificações Resinas fenólicas e modificações	(Epóxi poliamida, epóxi betume, epóxi polisulfeto, epóxi nylon) (fenol e resorcinol formaldeído, fenólico-nitrila, fenólico-neopreno, fenólico-epóxi)
		Poliésteres insaturados Poliaromáticos	Poliimida, polibenzimidazole, polibenzotiazole, polifenileno
		Furanos	(fenol furfural)

2.2.1 Caracterização dos adesivos estruturais

O desenvolvimento da ciência dos adesivos possibilitou a integração de adesivos sintéticos que eram produzidos de acordo com a utilização que lhe estava destinada, ou seja, com propriedades e proporções adequadas no sentido de suportarem as solicitações a que eram submetidos. Os adesivos utilizados em construção mecânica são, por natureza, materiais da

família dos materiais poliméricos, sendo um polímero uma longa cadeia de átomos ligados entre si por ligações covalentes [11].

Segundo a sua composição química, os adesivos classificam-se essencialmente em quatro grupos:

- Adesivos Termoendurecíveis: caracterizam-se por serem moldáveis, ou seja, aquecidos e arrefecidos, mas não repetidamente. Este adesivo não pode ser refundido ou restaurado até ao estado inicial antes da cura. A cura nestes materiais é originada através de uma reacção química irreversível com temperaturas variáveis conforme o tipo de adesivo.
- Adesivos Termoplásticos: são vistos como materiais que podem ser fundidos através da aplicação de calor, salientando que a constante aplicação a elevadas temperaturas pode levar à degradação destes por oxidação. Esta constante exposição limita o número de ciclos térmicos destes materiais, que se caracterizam pela sua estrutura molecular, linear ou ramificada. Contrariamente aos adesivos termoendurecíveis, estes têm uma menor resistência a agentes químicos, não curam com o calor, possuem uma temperatura de serviço mais limitada e o seu endurecimento, adesão e solidificação ocorrem por arrefecimento.
- Elastómeros: possuem a capacidade de retomar o seu comprimento inicial após serem sujeitos a grandes deformações por intermédio de esforços de tracção ou compressão. Isso é possível através da elevada tenacidade, do baixo módulo de elasticidade e ainda pela boa capacidade de deformação e de absorção de energia que estes materiais possuem. São descritos como materiais muito viscoelásticos, com elevada capacidade de resistir a forças de arrancamento, sendo bastante flexíveis, o que facilita a ligação de substratos com diferentes coeficientes de expansão térmica.
- Adesivos Híbridos: definem-se como adesivos compostos por combinações entre resinas termoendurecíveis, termoplásticas e/ou elastoméricas. A combinação destas resinas permite a estes adesivos conter na sua estrutura as propriedades mais relevantes de cada uma delas, como melhores valores de resistência ao arrancamento e melhor capacidade de absorção de energia.

No que se refere à família, os adesivos estruturais sofreram uma evolução notória durante o século XX. Essa evolução cronológica foi aclarada por Hartshorn em 1986 [14] de acordo com a Tabela 2.

Tabela 2 - Desenvolvimento cronológico dos adesivos.

Adesivos Estruturais	
1910	Fenol-formaldeído
1920	Colas de origem animal
	Colas vegetais
	Cola de peixe
	Colas à base de albumina
	Colas de caseína
1930	Uréia-formaldeído
1940	Nitrilo-fenólicos
	Vinílicos-fenólicos
	Acrílicos
	Poliuretanos
1950	Epóxidos
	Cianocrilatos
	Anaeróbicos
1960	Poliamida
	<i>Polibenzimidazole</i>
	<i>Polyquinoxaline</i>
1970	2º Geração - Acrílicos

Apesar da evolução cronológica, os adesivos estruturais sempre se caracterizaram como adesivos com elevado índice de desempenho, resistentes a quase todos os meios ambientes (mais comuns) e que apresentam bons níveis de resistência de corte, ostentando valores superiores a 7 MPa [1]. Estes adesivos têm como função sustentar ligações estruturais, suportando elevadas cargas sem que ocorram grandes deformações.

Por outro lado, os adesivos não estruturais não possuem a capacidade de suportar elevadas cargas pela frágil resistência ao corte e à temperatura que apresentam, chegando mesmo a se degradarem perante exposições prolongadas ao meio ambiente. Para além disso, apesar de

apresentarem baixa resistência a agentes químicos, a escolha do adesivo depende da aplicação que se pretenda. Quando estamos perante situações de ligações temporárias ou situações em que são usados em conjunto com um método mecânico, os adesivos não estruturais são ideais, pois têm capacidade de oferecer um isolamento e uma capacidade de amortecimento de vibrações fora do alcance dos adesivos estruturais.

2.2.2 Tipos de adesivos estruturais

Os adesivos estruturais são compostos por dois componentes quimicamente ligados entre si, e apresentam elevadas propriedades mecânicas e uma boa resistência química. O comportamento mecânico de uma ligação não depende inteiramente do adesivo, mas também do tipo de material a ser ligado, de todo o processo de ligação e preparação, cura, limpeza, entre outros. Contudo, se os adesivos estruturais forem bem empregues, fornecem uma união bastante forte entre os componentes a ligar. Actualmente são utilizadas diversas famílias de materiais poliméricos como adesivos estruturais, dos quais se destacam em termos de importância e campo de aplicação os seguintes [1]:

- Adesivos de epóxico;
- Adesivos fenólicos;
- Adesivos acrílicos;
- Adesivos à base de resorcinol-formol;
- Adesivos de poliimida e adesivos de bismaleimida (adesivos para altas temperaturas);
- Adesivos de poliuretano;
- Adesivos à base de borrachas;
- Adesivos de poliéster;
- Adesivos termofusíveis (*hot-melt*);

- Adesivos poliacetato de vinilo (PVA);
- Adesivos sensíveis à pressão;
- Adesivos proteicos.

Outro método de caracterização é segundo o método de reacção, que está directamente ligado ao processo de cura. A temperatura de cura, um dos parâmetros a ter em conta, na maioria das ocasiões influencia as características dos adesivos que por norma não possuem um elevado grau de reticulação. Os adesivos reagem ou solidificam essencialmente por quatro processos: reacção química, perda de solvente, perda de água ou ainda devido ao arrefecimento [7, 9].

É possível caracterizar um adesivo segundo a sua forma física, que está inteiramente ligada à sua composição. Os adesivos podem apresentar-se sob a forma de pastas ou líquidos, podendo uma ou mais partes não possuir solvente. Também podem apresentar-se apenas sob a forma líquida, ou seja, adesivos com solvente ou água, ou ainda sob a forma sólida, caso de adesivos em pó, fita e filme [9].

Para além das classificações referenciadas, o custo revela-se na actualidade como um parâmetro de importância significativa, em que o preço depende de factores como o método de produção e o volume em causa. A finalidade do adesivo, tipo, peso, método de processamento, assim como o tempo de cura, são critérios que estão ligados ao seu valor final. Relativamente ao modo de aplicação dos adesivos, recorrem-se muitas vezes a equipamentos como seringas, pistolas de aplicação manual ou equipamentos pneumáticos (Figura 10) para facilitar o processo de deposição [9].



Figura 10 - Equipamento para aplicação de adesivo: a) seringa, b) pistola manual e c) pistola pneumática.

2.3 Materiais de base

Os adesivos também podem ser classificados de acordo com o tipo de materiais a ligar. Assim, adesivos para metais, madeira ou vinilo, referem-se ao tipo de substrato para o qual são melhor adaptados. Do mesmo modo, adesivos resistentes aos ácidos, ao calor e ao meio ambiente indicam os meios para os quais são mais indicados [9]. A influência do material do substrato é um aspecto que contribui para o sucesso da junta colada. Para os aços de baixa resistência mecânica (aço macio), a resistência da junta é independente do adesivo pois o aço plastifica antes da rotura do adesivo e, para os aços de alta resistência mecânica (aço duro), a resistência da junta aumenta à medida que se usa adesivos mais resistentes e mais dúcteis [15, 16].

O material a seleccionar deverá corresponder às exigências e apresentar um baixo custo. De entre os materiais com estes requisitos, os aços ao carbono (de construção) são os que melhor empregam estas propriedades.

O alumínio é um dos elementos base mais utilizados para a realização de juntas de sobreposição simples. A escolha do alumínio deve-se não só às suas boas propriedades mecânicas, mas também ao amplo campo de aplicações estruturais em forma extrudida e laminada.

Diversos materiais base não metálicos são utilizados para as juntas coladas, como por exemplo os substratos de materiais poliméricos como o polietileno, o polipropileno, os substratos em compósito, entre outros. Muitas vezes, a selecção do material a utilizar não é definido pela compatibilidade com o adesivo ou gama de adesivo a usar, mas pela necessidade de ligar dados materiais de uma estrutura. Neste caso, deve ser seleccionado um adesivo compatível com estes materiais.

2.4 Técnicas de previsão em juntas adesivas

As técnicas de previsão de juntas adesivas podem ser baseados na solução de equações diferenciais formuladas para uma determinada configuração de junta ou em métodos

numéricos com o MEF. Os métodos mais utilizados para previsão das juntas são de seguida descritos com algum detalhe.

2.4.1 Métodos analíticos

Inicialmente, na análise de estruturas adesivas, os métodos de previsão consistiam em formulações analíticas. Os trabalhos de Volkersen [17] e Goland e Reissner [18] foram os pioneiros de uma série de estudos teóricos que tinham a vantagem da simplicidade para atingir os campos de tensões nas estruturas coladas. No entanto, estes modelos incluíam muitas hipóteses simplificativas em termos de geometria das estruturas, carregamentos, e condições de fronteira. Nestes casos, a resistência era tipicamente prevista por critérios baseados na tensão ou deformação máximas. Menciona-se a seguir os principais modelos analíticos para juntas de sobreposição simples, nomeadamente os modelos de Volkersen [17], Goland e Reissner [18] e Hart-Smith [19], indicando as suas limitações.

Volkersen

A primeira análise numa junta de sobreposição simples pertence a Volkersen [17]. Esta análise é a mais simples e também a mais limitada para obter as tensões na junta, baseando-se na sobreposição de substratos e na hipótese que o adesivo apenas se deforma em corte (Figura 11). Outros modelos foram desenvolvidos posteriormente, os quais consideram deformações nos substratos e outras componentes de tensão (arrancamento).

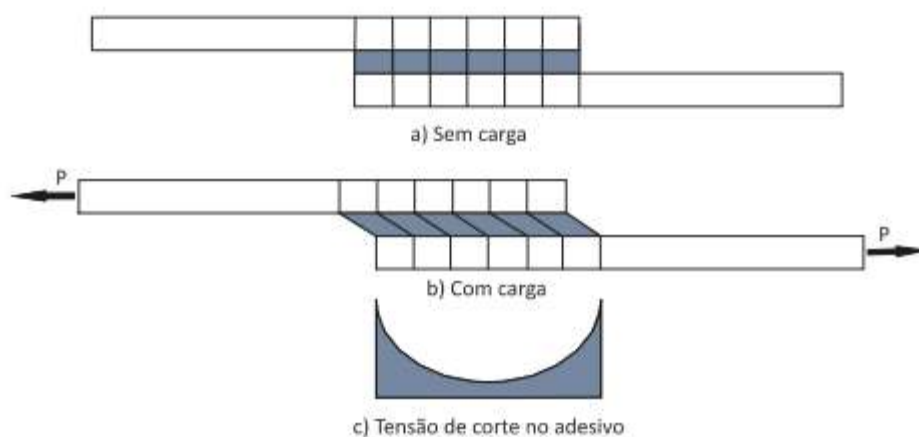


Figura 11 - Distribuição das tensões de corte no adesivo pelo modelo de Volkersen [9].

Volkersen diz que, como mostra a Figura 11(b), a deformação diferencial dos aderentes provoca o aparecimento de picos de tensões de corte nas extremidades das juntas (Figura 11c).

Goland e Reissner

O modelo de Goland e Reissner [18] foi desenvolvido alguns anos após o modelo de Volkersen, e considera adicionalmente o efeito de rotação da junta, induzido pela excentricidade da carga aplicada, e que provoca esforços de arrancamento na camada de adesivo. Desprezado por Volkersen, este efeito provoca um momento flector da junta quando as forças não são colineares (Figura 11b). As deformações deixam de ser proporcionais à força aplicada, o que resulta em não linearidades geométricas. Em termos de tensão de corte os resultados de ambos são muito semelhantes, mas para além da tensão de corte a análise de Goland e Reissner permite a obtenção de tensões transversais de arrancamento na camada de adesivo, como mostra a Figura 12.

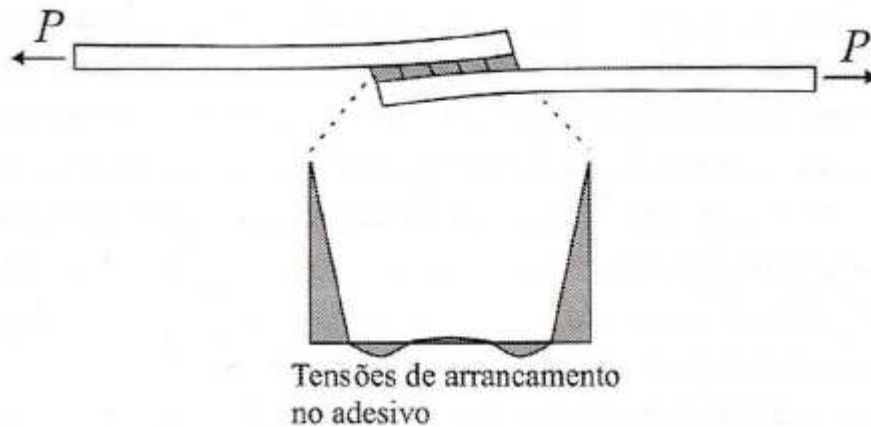


Figura 12 - Distribuição das tensões de arrancamento no adesivo pelo modelo de Goland e Reissner [9].

Hart-Smith

A análise de Hart-Smith [19] tem algumas semelhanças relativamente às análises de Volkersen e Goland e Reissner, mas considerando para além das deformações elásticas as propriedades plásticas dos adesivos que foram desprezadas por estes. As análises anteriores só consideravam o comportamento elástico dos substratos e adesivo, o que pode provocar um erro elevado na previsão da resistência, por exemplo no caso de epóxidos modificados como borracha [20].

Hart-Smith descobriu que a plasticidade do adesivo aumenta a resistência de uma junta relativamente à análise elástica e avaliou o comportamento da junta de sobreposição simples e de sobreposição dupla, bem como o comportamento de juntas em substratos diferentes.

Muitos outros modelos analíticos de juntas foram desenvolvidos posteriormente de forma a diminuir as limitações dos métodos referidos [21]. Quanto mais aproximado é o método da realidade, mais complexa é a sua aplicação analítica, recorrendo-se a métodos numéricos para a resolução dos modelos.

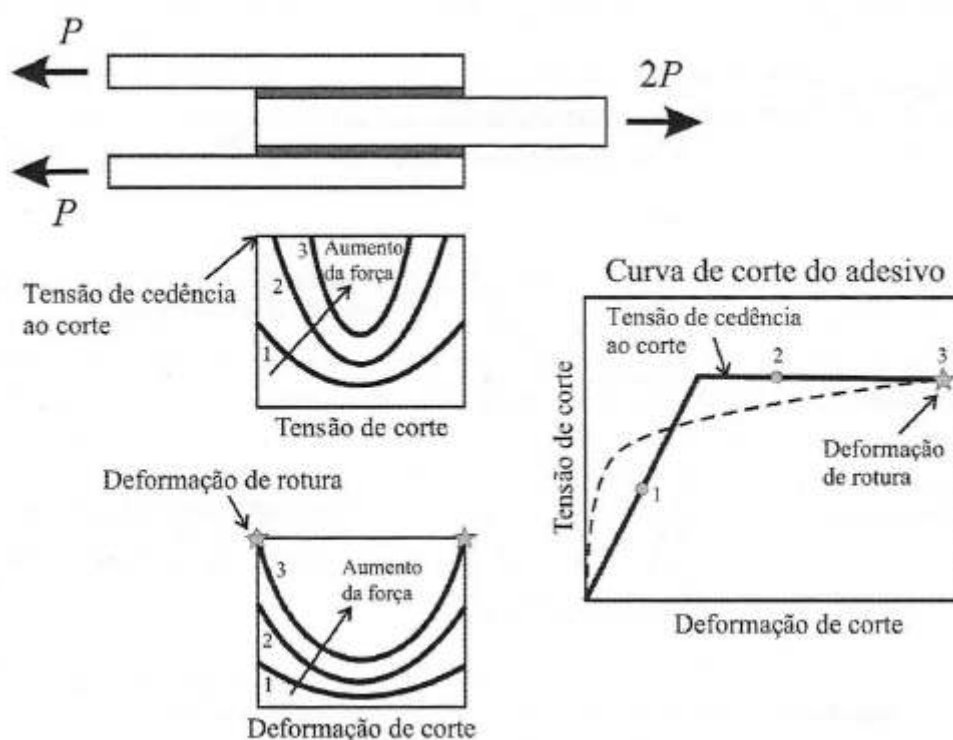


Figura 13 - Plasticidade no adesivo de acordo com Hart-Smith [9].

Para caracterizar o comportamento do adesivo, Hart-Smith escolheu um modelo elasto-plástico (Figura 13), de tal modo que a tensão e deformação de rotura ao corte no modelo são iguais aos valores de tensão e deformação de rotura ao corte da curva de tensão-deformação real do adesivo. As duas curvas mantêm a mesma energia de deformação presente na área por baixo das mesmas [9, 22, 23].

2.4.2 Métodos numéricos

A utilização de técnicas numéricas para previsão de resistência de juntas adesivas está intimamente ligada à utilização do MEF. Este método é baseado na discretização de um domínio nos chamados EF, ligados pelos seus nós, e cuja simplificação resulta na criação de um sistema de equações algébricas como alternativa às equações constitutivas integrais ou diferenciais que estão na base do método [24]. A previsão da resistência das juntas segundo métodos numéricos pode ser feita com recurso aos seguintes métodos, todos eles dependentes de modelação por MEF:

- Mecânica dos meios contínuos;
- Mecânica da fractura;
- Modelos de dano coesivo;
- Mecânica do dano;
- Método de Elementos Finitos Extendido.

Para melhor compreensão destes métodos, estes são de seguida descritos com algum detalhe.

2.4.2.1 Mecânica dos meios contínuos

Os métodos de previsão de resistência de juntas adesivas baseados na mecânica dos meios contínuos consistem na utilização de métodos analíticos ou numéricos para a obtenção dos valores máximos de tensão, deformação ou energia de deformação. A partir desta informação e usando um critério de resistência, é possível prever a resistência da ligação. Nestes critérios normalmente considera-se uma dada componente do estado de tensão ou deformação no adesivo, apesar das restantes componentes não serem nulas [24]. É considerado que a cedência ou rotura acontece quando a componente considerada igualar o valor limite do material. Quando associados à obtenção do valor característico pelo MEF, estes critérios são sensíveis ao tamanho da malha utilizado, devido à existência de singularidades de tensões nas extremidades da junta. Contudo, a tensão principal máxima continua a ser um critério fiável para juntas com adesivos frágeis [25].

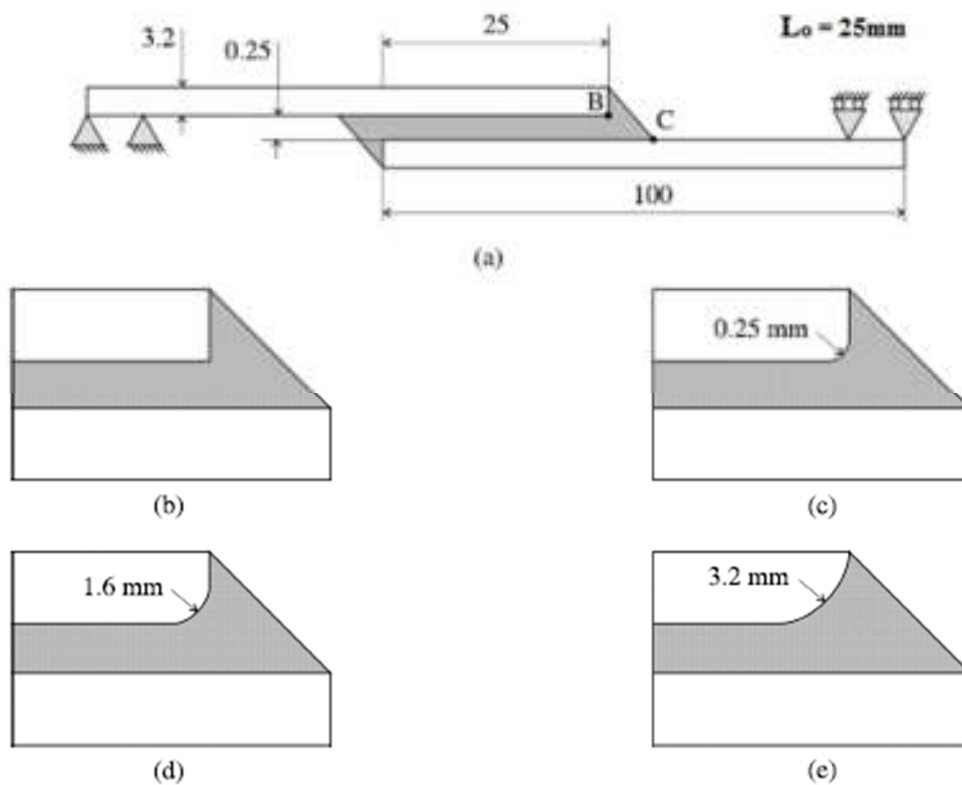


Figura 14 - Juntas com ângulos de arredondamento diferentes [24].

Uma maneira de reduzir os efeitos de malha pela eliminação da singularidade consiste na utilização de geometrias com as extremidades arredondadas, como mostra a Figura 14. Segundo Zhao et al. [26], esta alteração origina uma variação na distribuição de tensões na zona modificada geometricamente. A Figura 15 exemplifica a eliminação da singularidade de tensões na extremidade da sobreposição das juntas com a aplicação destas geometrias.

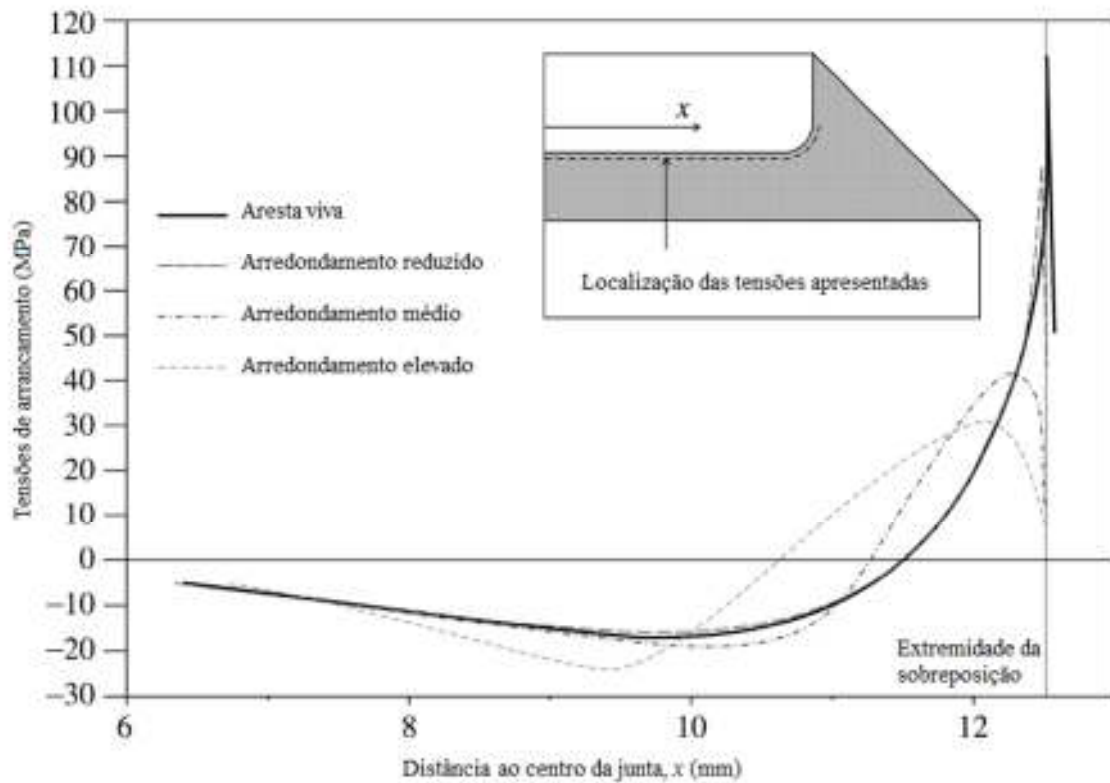


Figura 15 - Distribuição das tensões de arrancamento no adesivo sujeito a uma carga de 2kN [24].

Clarke e McGregor [27] efectuaram a previsão da resistência numa junta de sobreposição simples quando a tensão principal máxima no adesivo excedia a tensão máxima à tracção do mesmo adesivo em provete maciço ao longo de um determinado comprimento normal à direcção da tensão principal máxima. Não foi dada nenhuma justificação para a escolha do tamanho da zona analisada. A variação da resistência estimada para a junta não foi significativa com a mudança de geometria da junta, como por exemplo o arredondamento do canto da extremidade do substrato em contacto com o adesivo.

2.4.2.2 Mecânica da fractura

Estes métodos surgiram com o intuito de colmatar a incapacidade da mecânica dos meios contínuos em solucionar certos problemas existentes nas estruturas, tais como pontos de descontinuidade de tensões que resultam em singularidades de tensões e de deformações. O objectivo da Mecânica da Fractura é determinar se um defeito numa estrutura irá ou não

levar o componente à rotura catastrófica, e ainda determinar o grau de segurança efectivo de um componente danificado. De facto, a mecânica dos meios contínuos adopta que a estrutura e o seu material são contínuos e que as tensões calculadas são singulares na extremidade da fenda. A teoria da mecânica da fractura foi desenvolvida em especial para casos em que estejam presentes fendas nas estruturas.

A fractura pela propagação de fissuras pode ser induzida de várias maneiras, como pela aplicação de cargas lentas, de impacto, por fadiga, devido a gradientes de temperatura ou ainda por deformações dependentes do tempo [9, 28, 29].

Uma grande parte dos estudos realizados em juntas adesivas utilizam a taxa de libertação de energia, G , e o respectivo valor crítico ou resistência à fractura, G_c [30] em vez de factores de intensidade de tensão, K , pois estes não são fáceis de determinar quando a fenda cresce numa interface ou na sua proximidade. No entanto, a fractura de juntas adesivas ocorre normalmente em modo misto por causa da complexidade do estado de tensão e do efeito dos substratos. Para lidar com este tipo de carregamento, existem critérios de fractura em modo misto, semelhantes aos critérios de rotura clássicos, embora neste caso deva ser introduzido o conceito de superfície ou envelope de fractura para lidar com a mixicidade do carregamento [24].

2.4.2.3 Modelos de dano coesivo

O estudo destes modelos teve início com Barenblatt [31, 32] e Dugdale [33]. O conceito da zona coesiva foi proposto por esses autores para descrever o dano sob cargas estáticas na zona de processo de fractura à frente da ponta da fenda. Estes modelos foram largamente refinados e testados como forma de simular o início da ocorrência de uma fenda e da propagação desta no interior ou em interfaces entre materiais, ou ainda em delaminação de compósitos. Uma característica destes modelos é que podem facilmente ser incorporados em programas que têm como base o método de EF e desta forma avaliar o comportamento de vários materiais sujeitos a fractura [34]. O princípio fundamental dos modelos de dano coesivo (MDC) é que é possível introduzir artificialmente um ou múltiplos planos de fractura em estruturas, nos quais é permitido o crescimento do dano pela introdução de uma descontinuidade no campo dos deslocamentos. A técnica consiste no estabelecimento de leis de tracção-separação (também denominadas leis coesivas) para modelar interfaces ou

regiões finitas. As leis coesivas são aplicadas entre nós emparelhados de elementos coesivos, e podem ligar nós sobrepostos de elementos representando diferentes materiais ou camadas diferentes em compósitos [35], ou podem ser aplicados directamente entre dois materiais para simular uma camada fina, por exemplo para simular uma ligação adesiva [36].

Os MDC proporcionam uma propagação macroscópica dos danos existentes ao longo de um percurso, desvalorizando os fenómenos microscópicos presentes no início da fenda, através da implementação das leis de tensão-deslocamento relativo (t - δ). Estes modelos são usados para simular a evolução elástica da tensão e consequentemente amaciamento, até à rotura completa, permitindo desta forma simular a deterioração gradual das propriedades dos materiais. As leis de tracção-separação são frequentemente representadas por relações lineares em cada uma das etapas de carregamento (elasticidade, plasticidade e/ou degradação), apesar de qualquer uma das etapas poder ser definida de uma forma distinta, de maneira a possibilitar uma representação mais fiel do comportamento dos materiais [37]. Este modelo foi implementado em *softwares*, como o caso do ABAQUS®, em duas (2D) e três dimensões (3D). O caso do modelo triangular 2D foi implementado para análise estática, enquanto o modelo 3D [38], embora seja muito similar ao primeiro, inclui uma componente adicional de corte.

O modelo triangular 2D está representado na Figura 16, onde a lei de maiores dimensões representa as leis em modo puro, e a lei de menores dimensões representa a lei em modo misto.

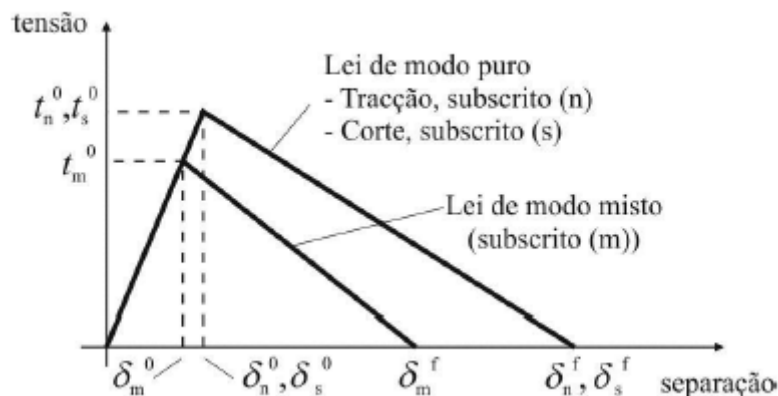


Figura 16 - Lei Modelo de Dano Coesivo (MDC) triangular [24].

Ridha et al. [39] consideraram reparações por remendo embebido em painéis de compósito colados com um adesivo de epóxido de alto módulo (FM[®] 300M (Cytec)). Foram consideradas leis de amaciamento linear, exponencial e trapezoidal como modelo plástico no adesivo, e a modelação por degradação linear resultou em cerca de 20% de previsão por defeito da resistência, por causa da degradação excessiva nas extremidades da junta que não foi observada no comportamento real.

2.4.2.4 Mecânica do dano

Nestes métodos, estabelece-se um parâmetro de dano para modificar a resposta constitutiva dos materiais através de uma redução de rigidez ou resistência. Como exemplos de aplicação destes modelos para depreciação das propriedades referem-se ligações adesivas finas [40], delaminação de compósitos ou ainda rotura da matriz de materiais compósitos [41]. Este parâmetro pode ser utilizado numa lei de evolução de dano para modelar o dano antes da iniciação da fenda e durante o crescimento da mesma. As variáveis de dano podem ser classificadas em dois grupos. No primeiro grupo as variáveis modelam o dano pela redefinição das propriedades constitutivas dos materiais, embora estas não estejam directamente relacionadas com o mecanismo de dano. No segundo grupo, as variáveis são relacionadas com a definição física de um género específico de dano, como a dimensão das porosidades ou a área relativa de micro-cavidades.

Hua et al. [42] propôs um modelo de mecânica do dano com resultados independentes da malha para a previsão da resistência de juntas adesivas sujeitas a degradação ambiental. Foram consideradas juntas coladas com um adesivo dúctil sujeitas a diferentes condições de degradação ambiental. Na modelação numérica, este efeito foi conseguido através da introdução de um parâmetro de dano com base em deslocamentos na equação constitutiva dos materiais, dependente do grau de humidade. Este parâmetro foi calibrado utilizando o teste *Mixed-Mode Flexure* (MMF) em amostras envelhecidas. O parâmetro de dano permitiu obter uma função linear da resposta do material na ausência de dano, dando um valor pequeno das tensões actuais, dependendo do deslocamento plástico equivalente em vez da deformação, para assegurar resultados independentes da malha. A implementação deste conceito permitiu a definição de um comprimento equivalente, vinculado a cada ponto de integração dos elementos sólidos. O deslocamento do plástico equivalente foi calculado a partir da energia de ruptura como sendo o trabalho de fractura da tensão de cedência após o início do dano.

Chen et al. [43], através da energia de deformação plástica média, previram o início da rotura e a propagação desta em JSS (Figura 17), bem como a carga de ruptura. Através de uma análise por EF, foi possível executar uma simulação do processo de rotura da seguinte forma. Quando era obtida uma solução convergente após cada incremento de carga, era realizada uma verificação para averiguar se a condição de rotura tinha sido atingida em qualquer região da junta. Perante estas condições, os valores de E e do coeficiente de *Poisson* (ν) do material no interior da região são repostos a zero ou muitos próximos de zero, de tal modo que o elemento ou elementos correspondentes podem deformar-se quase livremente sem transferir qualquer carga. A comparação entre resultados experimentais e EF no que concerne às cargas de ruptura mostrou que o critério de energia específico utilizado foi bastante bem sucedido para a previsão da fractura. Todas as análises realizadas foram baseadas em condições bastante realistas: todos consideram a teoria de grandes deslocamentos e todos os materiais foram tratados elasto-plasticamente com base nos seus resultados experimentais, com ou sem um filete de adesivo.

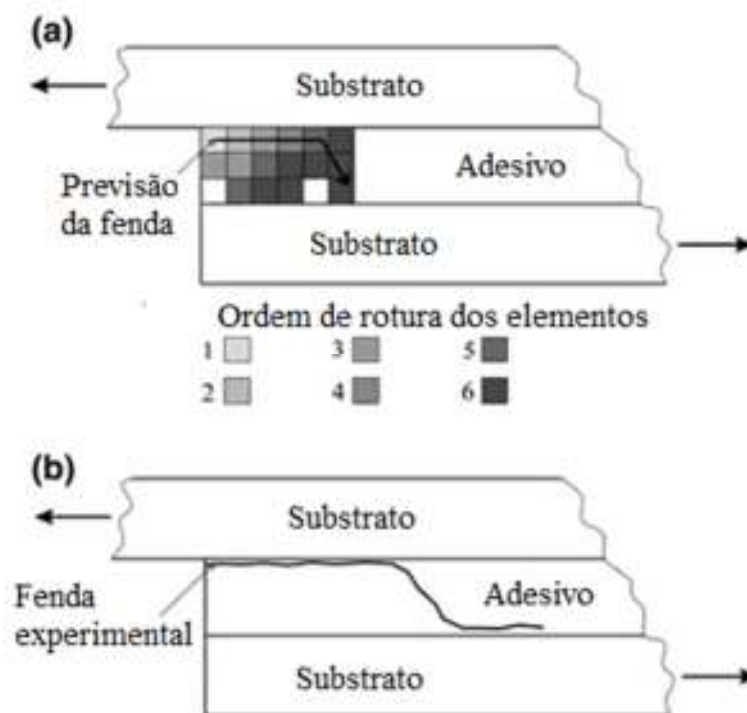


Figura 17 - Processo de rotura das JSS; (a) esquema de rotura obtida numericamente; (b) rotura no adesivo obtida experimentalmente por Chen et al [43].

2.4.2.5 Método de Elementos Finitos Estendido

O MEFX é uma melhoria recente do método MEF para a modelação do crescimento do dano em estruturas. Este método também utiliza leis de dano para a previsão da fractura, que se baseiam na resistência dos materiais para a iniciação do dano, e deformações para a avaliação da rotura (definido pelo G_n^c), em vez dos valores de t_n^0/t_s^0 ou δ_n^0/δ_s^0 utilizados pelos MDC. O MEFX ganha vantagem sobre a modelação MDC uma vez que não é obrigatório que a fenda siga um caminho pré-definido. De facto, existe a possibilidade de crescimento das fendas no interior de uma região sem o requisito da geometria das descontinuidades coincidir com a malha e sem a necessidade de refazer a malha na proximidade da fenda [44]. Este método é uma extensão do MEF, cujas características fundamentais foram apresentadas no final dos anos 90 por Belytschko e Black [45]. O MEFX baseia-se no conceito de partição de unidade e pode ser implementado no método tradicional de MEF pela introdução de funções de enriquecimento locais para os deslocamentos nodais perto da fenda, para permitir o seu crescimento e separação entre as faces da fenda [46]. Durante o crescimento da fenda, a extremidade desta muda a sua posição e orientação continuamente, dependendo das condições de carga e da geometria da estrutura, e em simultâneo são criadas as funções de enriquecimento necessárias para os pontos nodais dos EF à volta do percurso/extremidade da fenda.

A utilização do MEFX para a previsão da resistência de juntas adesivas é extremamente reduzida na literatura. Um exemplo da utilização deste método é o trabalho de Campilho et al. [47], em que se efectuou uma comparação dos métodos MDC e MEFX para a simulação de juntas de sobreposição simples e dupla entre aderentes de alumínio, coladas com um adesivo frágil. Os autores concluíram que a utilização do MEFX para propagação do dano em modo misto na camada de adesivo não é a mais adequada, uma vez que a direcção da fenda é perpendicular à tensão principal máxima. No entanto, conseguiu-se uma precisão razoável da previsão da resistência das juntas ao considerar que a rotura iniciava na altura da iniciação da fenda. Por outro lado, os MDC revelaram previsões bastantes precisas do comportamento da junta.

2.5 Juntas híbridas

O projecto e a análise de juntas resistentes e com durabilidade é uma das áreas com mais importância na engenharia actual. As juntas híbridas são consideradas como um grande avanço na tecnologia em alternativa às juntas mecânicas convencionais e às juntas coladas. Combinar adesivos e ligações mecânicas em aplicações estruturais pode levar ao melhoramento da fase inicial (projecto) e também ao peso final da estrutura. Geralmente este tipo de junta está ligado à área da aeronáutica, defesa e desporto motorizado [38].

As ligações híbridas combinam a ligação adesiva com outras técnicas de união (por exemplo adesivas-soldadas, adesivas-rebitadas ou adesivas-aparafusadas), e têm sido consideradas para melhorar a tolerância ao dano (estático ou fadiga) ou para reparações, envolvendo um processo de fabrico expedito, devido a não ser necessária a utilização de dispositivos de aperto durante a cura.

Um exemplo de junta híbrida é a ligação adesiva-aparafusada. Verificou-se com diversos ensaios que é possível melhorar as características de resistência e de fadiga de juntas coladas com a introdução de um ponto de soldadura [38, 48].

2.5.1 Juntas adesivas-soldadas

A junta adesiva-soldada é uma ligação híbrida que utiliza tanto a soldadura como o processo de colagem (Figura 18). Este tipo de junta proporciona as vantagens de ambos os processos, enquanto minimiza as suas desvantagens. Os benefícios da resistência instantânea e a alta resistência ao arrancamento fornecida pela soldadura, completam as vantagens da distribuição de tensões, fadiga e resistência à vibração das juntas adesivas, o que se traduz numa grande flexibilidade na fase de projecto. Esta tecnologia de ligação tem sido largamente aplicada em diversas zonas do automóvel, como por exemplo no chassis, ou nas colunas laterais das portas. Segundo Schwarts [49], as juntas adesivas-soldadas foram desenvolvidas e usadas pela União Soviética em aviões do tipo AN-24. Este processo foi aperfeiçoado para o método *weld-through*, ou seja, soldadura após realização da junta adesiva, enquanto o primeiro método utilizado era o método *flow-in*, em que inicialmente era efectuado o ponto de soldadura, seguido de preenchimento da ligação com adesivo por acção capilar e respectiva cura [21, 50].

Comparativamente com as ligações mecânicas, as juntas adesivas-soldadas trouxeram os seguintes benefícios [51]:

- Elevada resistência estática;
- Melhoria na resistência à fadiga;
- Diminuição das operações de cura;
- Melhor resistência à corrosão;
- Redução dos custos de produção e adaptabilidade à mecanização.

Para realizar uma boa ligação, o adesivo deve ter boa molhagem e viscosidade reduzida, de modo a obter uma ligação de boa qualidade. Uma cura acelerada do adesivo antes ou depois da soldadura, ou muito tempo de espera devem ser evitados uma vez que podem aumentar significativamente a resistência de contacto eléctrico ao realizar o ponto de soldadura. Valores elevados de resistência entre eléctrodos de soldadura podem levar a calor excessivo na zona termicamente afectada, correndo-se o risco de o adesivo ser expelido da junta ou então impedir que a corrente passe pelo adesivo. Devem ser tomados em consideração o tempo de soldadura e a força exercida pelos eléctrodos devido à sua influência sobre o fluxo do adesivo, a fim de assegurar que as superfícies ficam soldadas entre si [52, 53].

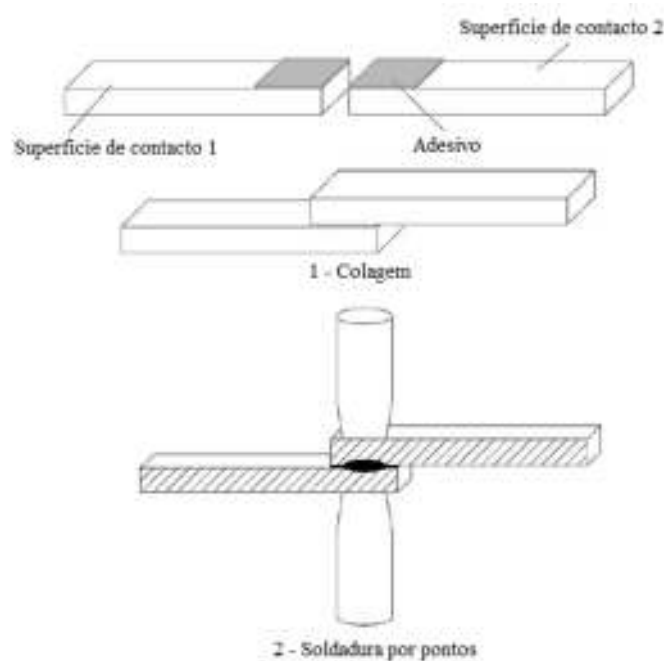


Figura 18 - Processo ligação de juntas adesivas-soldadas através da técnica "weld-through" [52].

2.5.2 Juntas adesivas-aparafusadas

Para este tipo de juntas a distribuição de esforços é complexa devido à introdução de alterações geométricas (furação nos substratos) para o fabrico das ligações. A distribuição de tensões numa junta de sobreposição simples tem sido calculada através de modelos de EF tridimensionais, incluindo os efeitos do contacto do parafuso no furo e o comportamento da não linearidade do material [54].

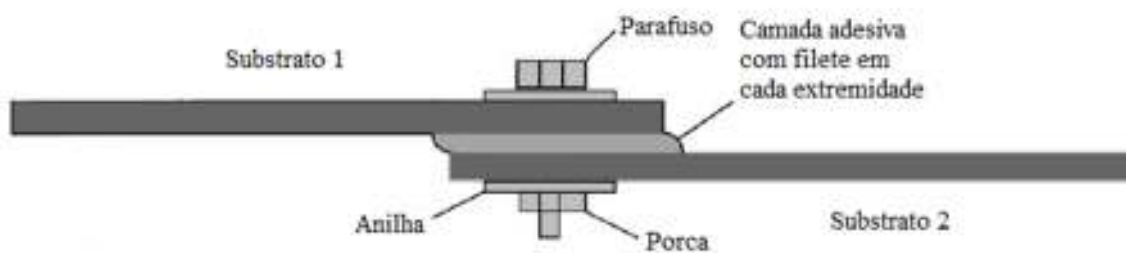


Figura 19 - Representação esquemática de uma ligação adesiva-aparafusada.

De salientar que uma grande e significativa desvantagem deste tipo de juntas é a concentração de tensões em torno do furo, pois estas podem comprometer a integridade estrutural do conjunto. A deterioração das propriedades mecânicas na presença de ambientes agressivos, e como as temperaturas e agentes corrosivos, são também uma preocupação para garantir uma eficácia plena deste tipo de ligação [55].

Este tipo de junta trouxe algumas vantagens como por exemplo a melhor resistência da junta comparativamente à junta mecânica, a eliminação dos processos de isolamento de fluidos, a resistência à corrosão entre substratos e também a minimização dos ruídos por vibração. O grau de aceitação deste tipo de juntas tem vindo a aumentar, devido às vantagens mencionadas anteriormente.

2.5.3 Juntas adesivas-rebitadas

Este tipo de ligação é geralmente mais utilizado na indústria aeroespacial, pois neste ramo a exigência é bastante elevada e a margem de erro é zero. Se os tipos de adesivos e componentes mecânicos a ligar forem adequadamente escolhidos, é possível obter juntas

com características mais favoráveis às juntas rebitadas no que diz respeito à rigidez, resistência à fadiga e resistência à corrosão, ou relativamente às juntas adesivas no que diz respeito à resistência mecânica.

O melhor comportamento de uma junta é alcançado quando cada um dos elementos que a compõem aumenta com as diferentes propriedades embora, nalguns casos, as mesmas propriedades possam ser melhoradas pela própria união dos dois elementos da junta individual [56].

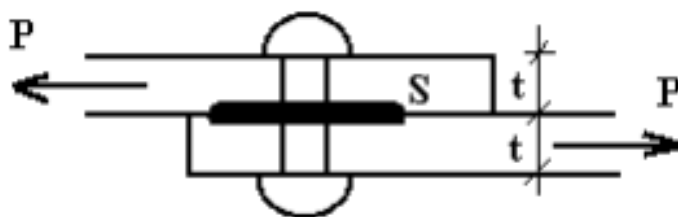


Figura 20 - Configuração esquemática de uma junta de sobreposição simples adesiva-rebitada.

2.5.4 Outros tipos de juntas híbridas

A escolha de um método de ligação específico é um aspecto importante na concepção e na actividade de fabrico, pois uma relação adequada entre resistência e custos de produção deve ser tida em conta. Novos projectos de produtos impõem novos métodos de ligação. As juntas de cravamento (*clinch*) são uma tecnologia relativamente nova, na qual os substratos são deformados localmente, sem qualquer elemento adicional. A combinação destas com juntas coladas originou uma junta híbrida com possíveis aplicações na indústria. A Figura 21 mostra uma junta de sobreposição simples já na sua fase final, ou seja, com o adesivo entre ambos os substratos.

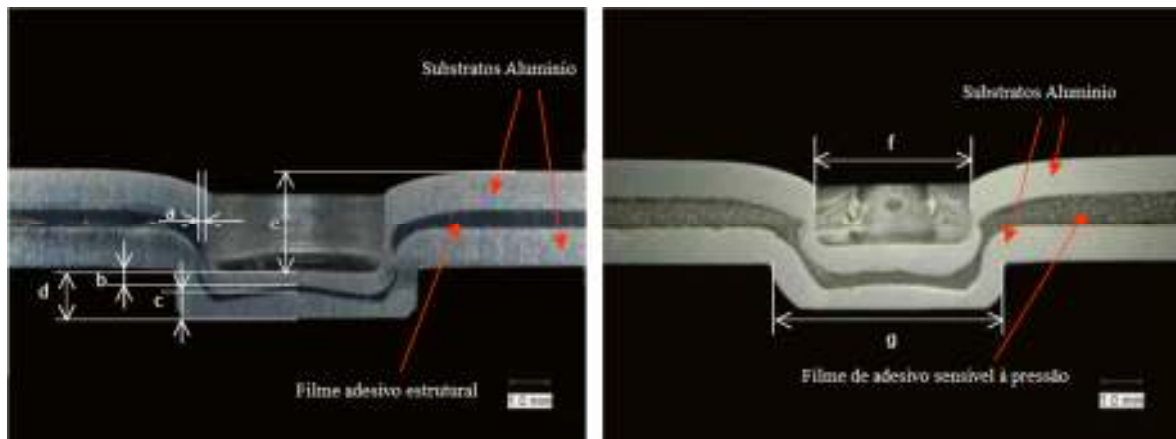


Figura 21 - Imagem em corte de uma junta adesiva-*clinch* [57].

Este método de ligação, ao contrário da ligação soldada, permite a união de diferentes tipos de materiais, como por exemplo aço, latão, cobre ou alumínio. Este processo de ligação necessita apenas de um punção e uma matriz, responsáveis por promover a deformação plástica localizada das chapas [57,58].

3 Trabalho experimental

O trabalho experimental consistiu no ensaio de juntas de sobreposição simples unidas por ligação adesiva, soldada e híbrida, sujeitas a esforços de tracção, com a finalidade de estudar a resistência e modos de rotura que estas oferecem a esta solicitação, e de compreender a variação destes em função do L_0 e tipo de adesivo. De facto, foram utilizados 3 adesivos cuja ductilidade varia desde o frágil até ao largamente dúctil, cujo comportamento se espera ser bastante distinto. Neste tipo de juntas de sobreposição simples foi utilizado apenas um tipo de substrato, três tipos de adesivo e quatro valores de L_0 . Para cada configuração de junta foram realizados 5 ensaios. Com 9 configurações de juntas testaram-se um total de 45 juntas, o que se traduz em 90 substratos. Os resultados das juntas Araldite® 2015 foram obtidos de um trabalho anterior, com geometria, materiais e condições de ensaios idênticos [38], para que possa ser feita a comparação com as restantes condições. Após a apresentação dos dados obtidos, são discutidos os resultados em função das características de cada adesivo, embora a discussão mais detalhada seja feita no capítulo 4, após realizada uma análise de tensões nas juntas.

3.1 Materiais

Neste subcapítulo são enumerados os diversos materiais utilizados no trabalho experimental, ou seja, os substratos e os adesivos, e foi feita uma análise detalhada das suas propriedades mecânicas mais relevantes, para utilização na análise numérica que se segue no capítulo 4. Diversas propriedades dos materiais foram excluídas pois para o contexto deste trabalho não foram relevantes, nomeadamente as propriedades químicas.

3.1.1 Substratos

O material utilizado para o substrato trata-se de um aço corrente DIN C45E. Este material foi escolhido devido à sua ampla utilização sob diferentes formas para diversas aplicações, e também pelo seu baixo custo de mercado, o que justifica a referida aplicabilidade. Uma vez que para o trabalho numérico é necessária a curva σ - ε até à rotura, e esta informação não se encontra disponível (devido a possíveis variações entre fabricantes), este material foi submetido a ensaios de tracção. Foram realizados 5 ensaios, nos quais se retirou toda a informação relevante ao trabalho.

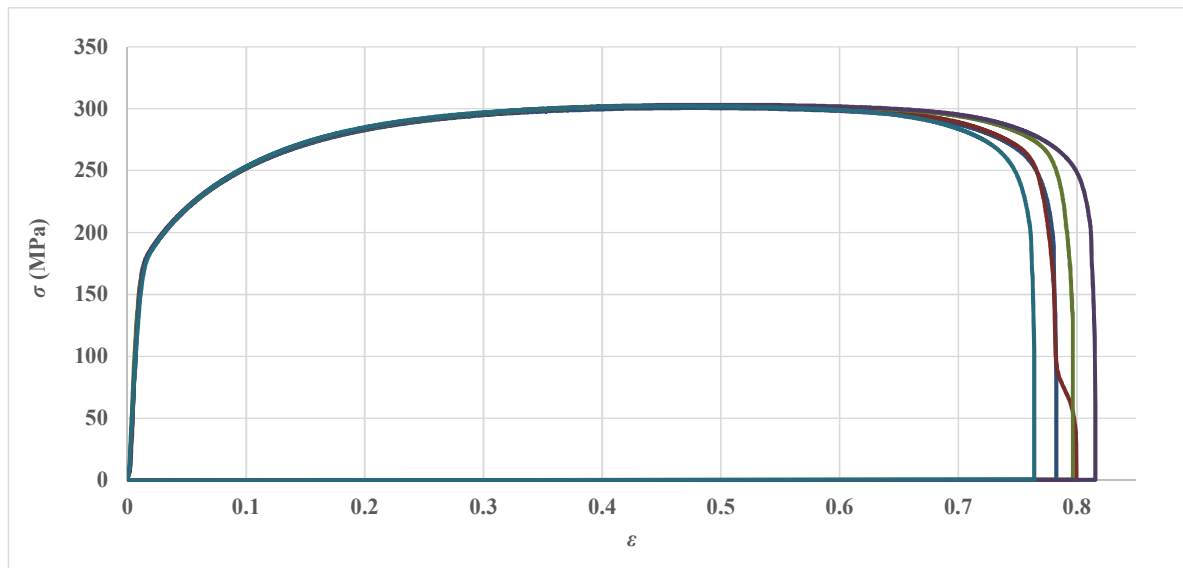


Figura 22 - Curvas σ - ε do aço DIN C45E.

Pela Figura 22 observa-se a grande repetibilidade dos resultados obtidos em termos de rigidez elástica à tracção, expressa pelo módulo Young (E), tensão de limite elástico ($\sigma_{\text{lim elast.}}$), tensão de rotura (σ_{rot}) e deformação de rotura (ε_r). Como valores médios e respectivo desvio obteve-se, $\sigma_{\text{lim elast.}} = 180,7 \pm 1,22$ MPa, $\sigma_{\text{rot}} = 301,93 \pm 0,79$ MPa e $\varepsilon_r = 79,16 \pm 1,93$ %. Foi utilizado um valor de E de 210 GPa, como valor de referência para o material em estudo.



Figura 23 - Rotura similar nos 5 provetes submetidos ao ensaio de tracção.

Como podemos verificar na Figura 23, a rotura dos substratos foi similar e acompanhada de estrição acentuada devido à ductilidade do material.

3.1.2 Adesivos

As propriedades dos adesivos usados neste trabalho foram determinadas em trabalhos anteriormente realizados. Os adesivos seleccionados para este trabalho, de forma a cobrir uma gama alargada de ductilidades, foram o adesivo epóxico frágil Araldite® AV138, o adesivo epóxico moderadamente dúctil Araldite® 2015 e o adesivo poliuretano dúctil Sikaforce® 7752.

3.1.2.1 Adesivo Araldite® AV138

O adesivo Araldite® AV138/HV988 é um adesivo frágil, conforme se pode observar nas curvas σ - ϵ da Figura 24. Trata-se de um adesivo epóxico, que se apresenta sob forma de líquido de dois componentes, a resina Araldite® AV138M-1 e o endurecedor HV988. A mistura da resina/endurecedor faz-se numa razão de 100g/40g, respectivamente. Estas

informações foram retiradas da ficha técnica disponibilizada pelo fabricante. Na Tabela 3 apresentam-se os parâmetros relevantes do adesivo.

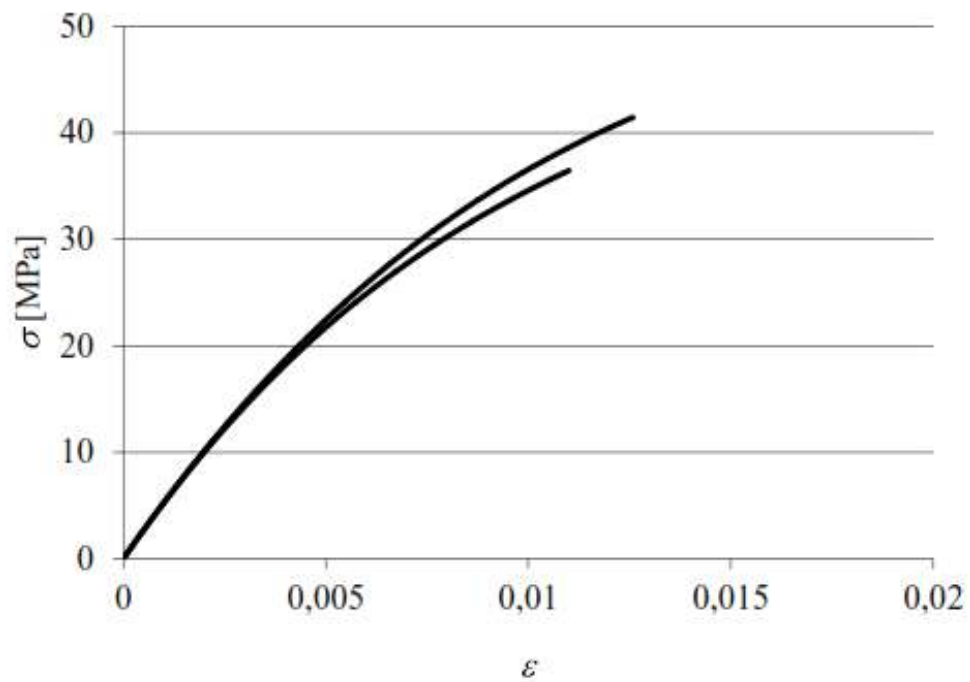


Figura 24 - Curvas σ - ε de provetes maciços de Araldite® AV138 [59].

Tabela 3 - Propriedades do adesivo Araldite® AV138 [59].

Propriedades	Araldite® AV138
Módulo de Young, E [GPa]	$4,89 \pm 0,81$
Coefficiente de Poisson, ν	$0,35^a$
Tensão de Cedência à tracção, σ_y [MPa]	$36,49 \pm 2,47$
Tensão de Ruptura à tracção, σ_f [MPa]	$39,45 \pm 3,18$
Deformação de Ruptura à tracção, ε_f [%]	$1,21 \pm 0,10$
Módulo de corte, G [GPa]	$1,56 \pm 0,01$
Tensão de Cedência ao corte τ_y [MPa]	$25,1 \pm 0,33$
Tensão de Ruptura ao corte, τ_f [MPa]	$30,2 \pm 0,40$
Deformação de Ruptura ao corte, γ_f [%]	$7,8 \pm 0,7$
Tenacidade à Tracção, G_{IC} [N/mm]	$0,2^b$
Tenacidade ao Corte, G_{IIC} [N/mm]	$0,38^b$

^a valor do fabricante^b valores estimados na referência [53]

3.1.2.2 Adesivo Araldite® 2015

Este adesivo é caracterizado como um adesivo epóxico estrutural de duas partes, com ductilidade moderada, e com bom comportamento quando sujeito à tracção ou ao corte. Como se trata de um adesivo dúctil, em junta adesiva permite alguma redistribuição das concentrações de tensões nas extremidades da camada de adesivo, o que se traduz numa resistência na junta muito aceitável. A mistura da resina/endurecedor faz-se numa razão de 1/1 em peso.

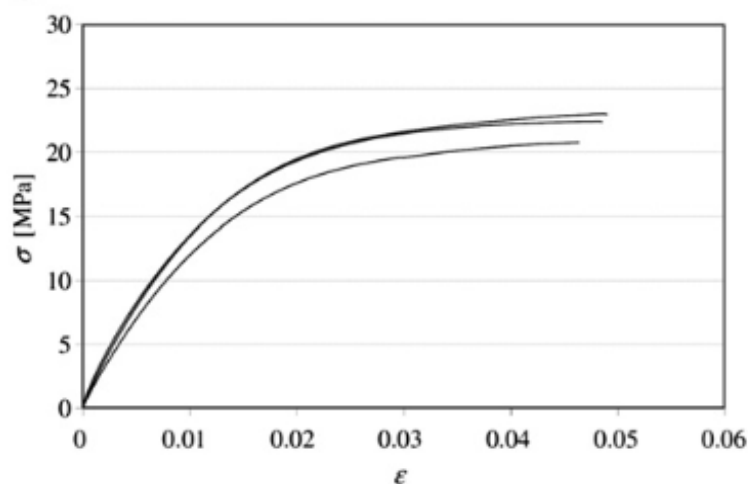


Figura 25 - Curvas σ - ϵ de provetes maciços de Araldite® 2015.

A Figura 25 mostra um exemplo das curvas σ - ϵ de provetes maciços (*bulk*) para este adesivo, que foram obtidas na referência [60]. Na Tabela 4 estão apresentadas as propriedades mecânicas mais relevantes deste adesivo.

Tabela 4 - Propriedades do adesivo Araldite® 2015 [38, 60].

Propriedades	Araldite® 2015
Módulo de Young, E [GPa]	$1,85 \pm 0,81$
Coefficiente de Poisson, ν	$0,33^a$
Tensão de Cedência à tracção, σ_y [MPa]	$12,63 \pm 0,61$
Tensão de Rotura à tracção, σ_f [MPa]	$21,63 \pm 1,61$
Deformação de Rotura à tracção, ϵ_f [%]	$4,77 \pm 0,15$
Módulo de corte, G [GPa]	$0,56 \pm 0,21$
Tensão de Cedência ao corte τ_y [MPa]	$14,6 \pm 1,3$
Tensão de Rotura ao corte, τ_f [MPa]	$17,9 \pm 1,8$
Deformação de Rotura ao corte, γ_f [%]	$43,9 \pm 3,4$
Tenacidade à Tracção, G_{IC} [N/mm]	$0,43 \pm 0,02$
Tenacidade ao Corte, G_{IIC} [N/mm]	$4,7 \pm 0,34$

^a valor do fabricante

Comparando os valores deste adesivo com os do Araldite® AV138, verifica-se que a deformação de rotura ao corte é quase seis vezes superior. Por outro lado, a tensão de rotura ao corte e à tracção do Araldite® AV138 é praticamente o dobro do Araldite® 2015.

3.1.2.3 Adesivo Sikaforce® 7752

O adesivo Sikaforce® 7752 é um adesivo dúctil, conforme se pode observar na curva σ - ε da Figura 26. Trata-se de um adesivo à base de poliuretano, que se apresenta sob a forma de dois componentes, resina e endurecedor. A mistura da resina/endurecedor faz-se numa razão de 100g/20g, respectivamente. Estas informações foram retiradas da ficha técnica disponibilizada pelo fabricante. Na Tabela 5 apresentam-se as propriedades mecânicas mais relevantes do adesivo [61].

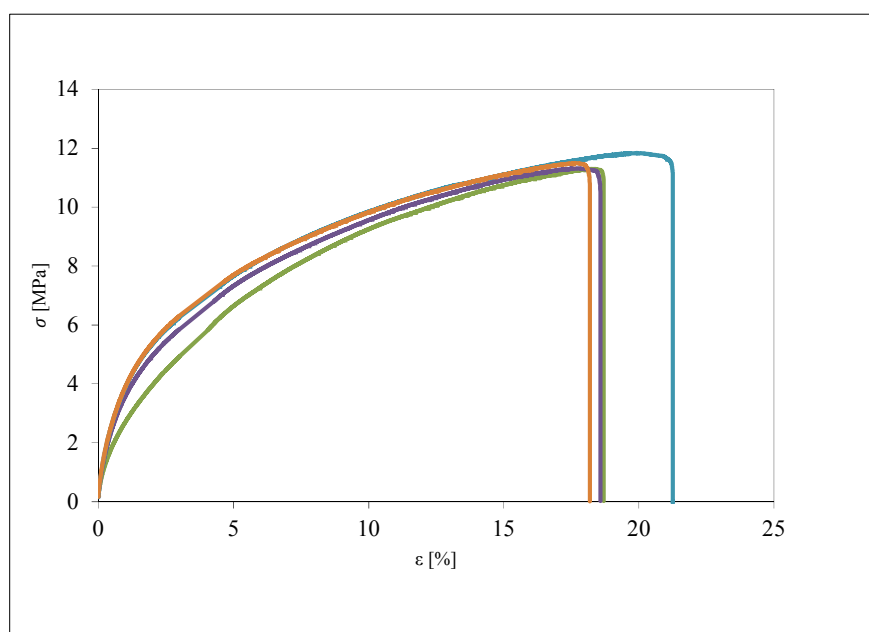


Figura 26 - Curvas σ - ε de provetes maciços de Sikaforce® 7752.

Tabela 5 - Propriedades do adesivo Sikaforce 7752[®] [61].

Propriedades	SikaForce [®] 7752 L60
Módulo de Young, E [GPa]	$493,81 \pm 89,6$
Coefficiente de Poisson, ν	$0,33^a$
Tensão de Cedência à tracção, σ_y [MPa]	$3,24 \pm 0,5$
Tensão de Ruptura à tracção, σ_f [MPa]	$11,49 \pm 0,3$
Deformação de Ruptura à tracção, ϵ_f [%]	$19,18 \pm 1,4$
Módulo de corte, G [GPa]	$187,75 \pm 16,4$
Tensão de Cedência ao corte τ_y [MPa]	$5,16 \pm 1,1$
Tensão de Ruptura ao corte, τ_f [MPa]	$10,17 \pm 0,6$
Deformação de Ruptura ao corte, γ_f [%]	$54,82 \pm 6,4$
Tenacidade à Tracção, G_{IC} [N/mm]	$2,36 \pm 0,2$
Tenacidade ao Corte, G_{IIC} [N/mm]	$5,41 \pm 0,5$

^a valor do fabricante

Em função das propriedades obtidas, é expectável que a resistência de juntas adesivas coladas com este adesivo seja elevada, pois este adesivo combina uma resistência muito aceitável com a elevada ductilidade dos poliuretanos. Assim, são permitidas tensões elevadas na camada de adesivo, bem como um efeito acentuado de plastificação sem ruptura das extremidades do adesivo com o carregamento progressivo das juntas, o que conduz a uma elevada resistência.

3.2 Geometrias estudadas

3.2.1 Dimensões e configurações de juntas

Para a realização dos ensaios foi utilizada a geometria típica de sobreposição simples com *tabs* nas extremidades da junta para centragem na máquina de tracção durante os ensaios. Na Figura 27 constam as dimensões da junta, bem como o modo do carregamento quando sujeita ao ensaio de tracção. O comprimento final da junta entre tabs (L_t) é sempre constante, bem como a espessura do adesivo (t_A), a espessura dos substratos (t_s) e a sua largura (w). Foram considerados L_0 de 15 mm e 30 mm. No trabalho numérico, apresentado no capítulo seguinte, foram considerados valores de L_0 de 15, 30, 45 e 60 mm.

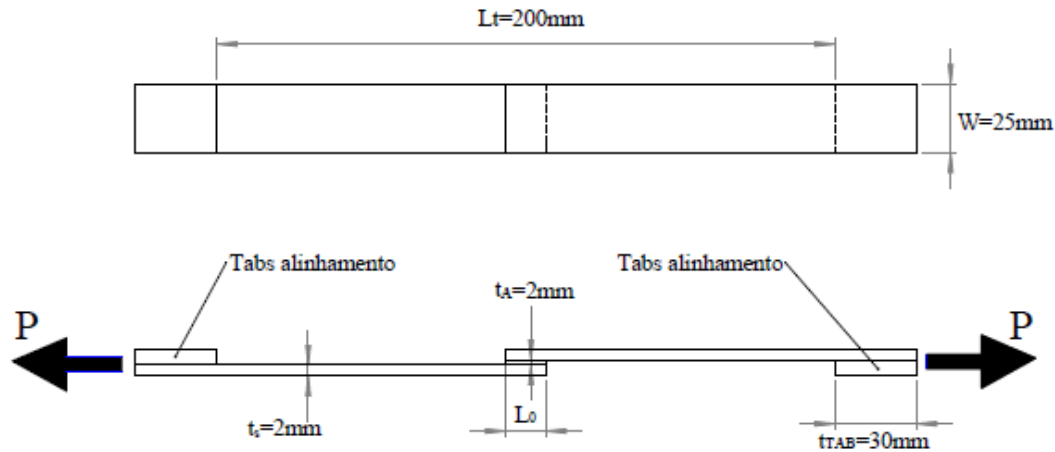


Figura 27 - Dimensões e geometria da junta de sobreposição simples.

3.2.2 Fabrico dos provetes

Os substratos foram obtidos a partir de tiras de aço C45E, já fornecidas pelo fabricante com a largura pretendida de 25 mm. Depois de desempenar as tiras, pois estas estavam empenadas devido ao corte feito pela guilhotina, foram cortadas vários substratos com o comprimento de 170 mm. Estes substratos foram sujeitos a dois processos, sendo que o primeiro processo define-se como processo mecânico de granalhagem, que tem como objectivos remover a camada superficial de óxido e aumentar a rugosidade da superfície, e assim melhorar o processo de colagem. O segundo processo consistiu na limpeza de excessos de resíduos e desengorduramento das superfícies com recurso a acetona, caracterizado como sendo um processo químico. A granalhagem dos substratos foi realizada com recurso a uma granalhadora “Cidblast” modelo RT6S (Figura 28) que se encontra no Laboratório de Ensaios Mecânicos no ISEP. Pretendeu-se com este processo aumentar a molhabilidade dos substratos, o que se revela de extrema importância pois melhora a adesão entre o adesivo e substratos, para além de aumentar a área de contacto.



Figura 28 - Granalhadora CIDBLAST, modelo RT6S.

Depois do processo de limpeza das superfícies dos substratos, procedeu-se à sua limpeza. Para garantir que a espessura do adesivo era uniforme em toda a superfície de contacto inseriu-se, nas zonas de sobreposição e antes de espalhar o adesivo, fio calibrado com diâmetro de 0,2 mm, como mostra a Figura 29. O fio calibrado foi fixo aos substratos com fita-cola. Após montagem dos dois substratos, apenas 2 a 3 mm de fio permanece na zona de sobreposição, no sentido de minimizar o efeito de corpo estranho na camada de adesivo. Foi utilizada uma cantoneira calibrada em alumínio e grampos para fixar os substratos correctamente, para garantir que estes não se deslocassem durante o fabrico das juntas. Revestiu-se a cantoneira com tiras de Teflon[®] para evitar que o excesso de adesivo una as juntas à cantoneira, facilitando assim a remoção dos provetes após cura. Depois de marcar com um paquímetro nos substratos os diferentes valores de sobreposição, foi aplicado o adesivo. A cura do adesivo aplicado no provete foi realizada segundo as especificações do fabricante para garantir uma cura completa, isto é, durante pelo menos 48 horas à temperatura ambiente para os três adesivos utilizados. No caso das juntas híbridas, depois da aplicação do adesivo as juntas foram levadas quase de imediato (até 10 minutos) para as oficinas Mecânicas do ISEP para realizar a ligação soldada por pontos. A esta técnica de fabrico das juntas híbridas, que consiste na realização do ponto de soldadura após colagem, designa-se por *weld-through*.

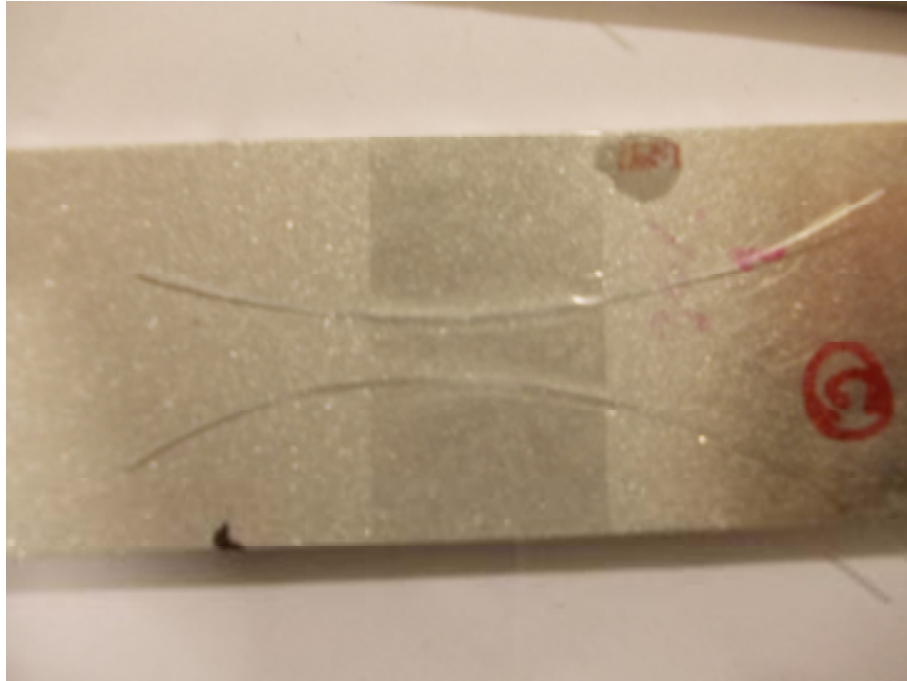


Figura 29 - Aplicação do fio calibrado de 0,2 mm.

Após cura dos adesivos, foram colados *tabs* nas extremidades dos substratos para garantir um alinhamento na máquina de ensaios à tracção. Depois da cura dos *tabs* procedeu-se à remoção do excesso de adesivo nas extremidades da sobreposição, inicialmente de forma manual com um alicate e seguidamente utilizando uma mó em forma cilíndrica e com o auxílio de uma máquina de furar. Neste último passo removeu-se com mais cuidado o excesso de adesivo restante na junta para evitar a introdução de defeitos na junta.



Figura 30 - Juntas híbridas após fabrico pelo método *weld-through*.

3.3 Condições de ensaio

Foi considerada uma semana de intervalo entre o fabrico e teste das juntas, para uma cura completa do adesivo. Os testes foram realizados numa máquina de ensaios Shimadzu AG-X 100 equipada com uma célula de carga de 100 kN (Figura 31), à temperatura ambiente e a 1 mm/min. Foram testados 5 provetes para cada configuração de junta.



Figura 31 - Máquina de ensaios Shimadzu AG-X 100 e fixação do provete.

Foi utilizada uma máquina de soldadura por pontos CEA[®] NKLT-28 para fabricar as juntas soldadas e híbridas, equipada com eléctrodos em forma de cone truncado ($\varnothing 6$ mm na zona de contacto) e com a capacidade de corrente máxima em curto-circuito de 14 kA (potência de soldadura de 25 kVA). Os parâmetros do equipamento são o tempo de aperto, representando o tempo (em ciclos de 50 hertz) entre o aperto dos substratos e o começo da soldadura, definido em 3 ciclos, o tempo de subida, representando o tempo necessário para alcançar a corrente de soldadura estipulada, definido em 5 ciclos, o tempo de soldadura,

correspondente à duração do fluxo de corrente, definido em 35 ciclos, e a corrente de soldadura, ajustada para 45% da capacidade da máquina ($\approx 6,3$ kA) [53].



Figura 32 – Máquina soldadura por pontos CEA® NKLT-28.

3.4 Resultados e comentários das juntas

Neste tópico apresentam-se as curvas $P-\delta$, modos de rotura e resistência das juntas com as várias configurações de ligação. São discutidos os resultados apresentados em termos de análise comparativa entre as várias condições, embora no capítulo da análise numérica seja feita uma discussão mais detalhada, com as informações obtidas do trabalho numérico, nomeadamente as distribuições de tensões nas juntas.

3.4.1 Modos de rotura das juntas

A Figura 33 demonstra superfícies representativas da fractura para juntas adesivas com $L_0 = 30$ mm (a,b), juntas híbridas com $L_0 = 30$ mm (c,d) e juntas soldadas com $L_0 = 30$ mm (e). Todas as roturas do adesivo, quer para as juntas adesivas ou híbridas, foram roturas coesivas. No entanto, a Figura 33 c),d) mostra claramente um anel de adesivo queimado à volta do ponto de soldadura, correspondente à carbonização causada pelas temperaturas

elevadas durante a soldadura. Apesar disto, este efeito foi sempre contido dentro de 1-2 mm do perímetro exterior do ponto de soldadura.

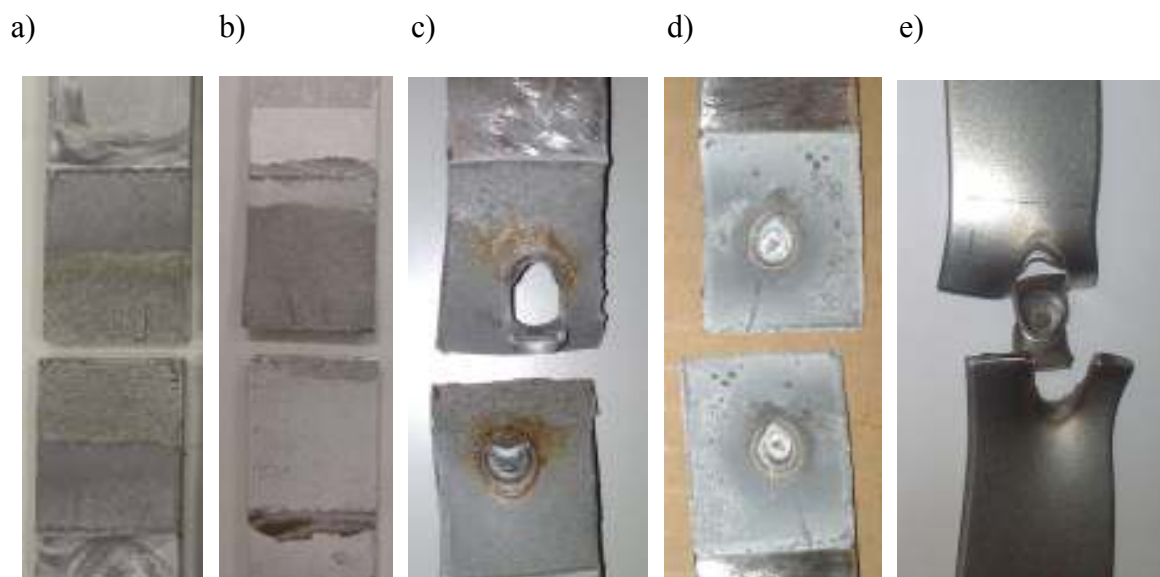


Figura 33 - Superfícies de rotura com uma junta adesiva de Araldite® AV138 (a), uma junta adesiva de Sikaforce® 7752 (b), uma junta híbrida de Araldite® AV138 (c), uma junta híbrida de Sikaforce® 7752 (d) e uma junta soldada (e).

Observando a rotura das ligações coladas com o adesivo Araldite® AV138, verifica-se que ocorreu uma rotura coesiva em todos os provetes, pois existe adesivo em ambas as superfícies dos aderentes, incluindo aqueles com $L_0 = 15$ mm, como exemplificado na Figura 34. De salientar que não se verificou deformação plástica transversal nos substratos, o que significa que a fragilidade do adesivo não permite atingir forças suficientes para a ocorrência deste fenómeno.

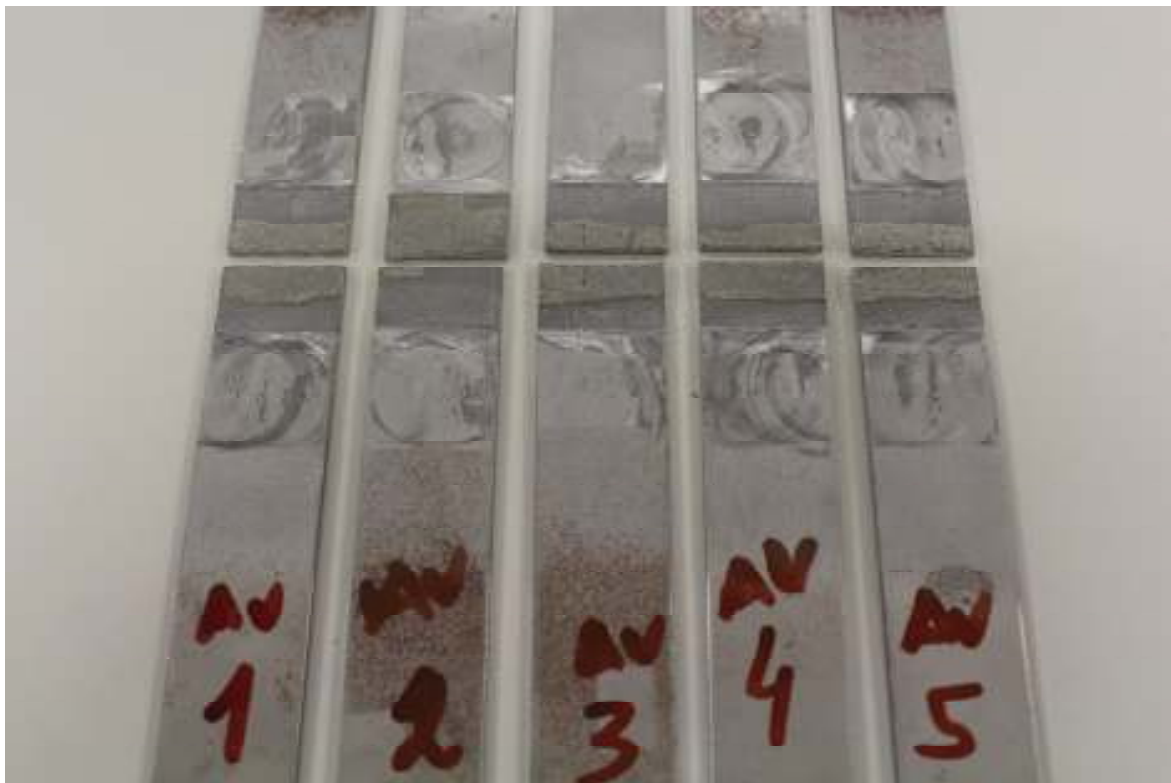


Figura 34 - Superfícies de rotura dos provetes com $L_0 = 15$ mm para o adesivo Araldite® AV138 (juntas coladas).

Tal como sucedeu nas juntas de Araldite® AV138, nas juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015 ocorreu novamente uma rotura coesiva em todos os substratos. Uma vez que o adesivo Araldite® 2015 é um adesivo mais dúctil que o adesivo Araldite® AV138, foram obtidos valores de $P_{máx}$ superiores, observando-se deformações plásticas dos substratos para $L_0 = 30$ mm. No entanto, este efeito não foi observado para as juntas com $L_0 = 15$ mm, pois as forças envolvidas também foram inferiores.



Figura 35 - Superfícies de rotura dos provetes com $L_0 = 30$ mm para o adesivo Sikaforce® 7752 (juntas coladas).

Na Figura 35 estão representadas as superfícies de rotura e também a deformação plástica dos substratos para as juntas coladas com adesivo Sikaforce® 7752 devido à grande ductilidade do adesivo Sikaforce® 7752, o que se traduziu em forças transmitidas superiores. A plastificação dos substratos foi mais visível nos provetes com $L_0 = 30$ mm pois a área de ligação é superior, o que se traduz numa maior resistência da junta. Refere-se que a plastificação nas extremidades da sobreposição prejudica a resistência da ligação, pois a excessiva deformação localizada nos substratos pode não ser acompanhada pelo adesivo, o que provoca a sua rotura prematura [19].

No caso das juntas híbridas com o adesivo Araldite® AV138, e tal como sucedeu nas juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138, a rotura foi coesiva em todas as juntas com $L_0 = 15$ e 30 mm. A rotura final (separação dos substratos) ocorreu pelo ponto de soldadura em praticamente todas as juntas, eventualmente com algum arrancamento de material do substratos.



Figura 36 - Superfícies de rotura dos provetes com $L_0 = 30$ mm para o adesivo Araldite® AV138 (juntas híbridas).

Como mostra a Figura 36, todos os provetes apresentaram uma rotura coesiva. A carbonização na periferia do ponto de soldadura adesivo foi causada pelas altas temperaturas e pela baixa condutividade eléctrica do adesivo. A rotura da junta passa por duas fases: inicialmente dá-se a rotura do adesivo, o que provocou um decréscimo abrupto da força transmitida sem haver rotura total da junta. Na segunda fase, após a rotura do adesivo, o ponto de soldadura continuou a suportar a carga até à rotura da junta (separação dos provetes). Numa primeira análise verificou-se um pequeno aumento da resistência do adesivo relativamente à junta colada, o que indica à partida que o ponto de soldadura numa junta influencia positivamente a resistência do adesivo. O aumento de L_0 de 15 mm para 30 mm traduziu-se num aumento mais reduzido da resistência da junta. Neste último caso, a rotura do ponto de soldadura ocorreu ligeiramente abaixo do valor respectivo para as juntas soldadas, devido à presença de adesivo na zona da soldadura, que poderá ter afectado negativamente a sua resistência.

As juntas com o adesivo Araldite® 2015 apresentaram uma rotura coesiva em todas as juntas, tanto nas juntas adesivas como nas juntas híbridas. A carbonização também se fez notar nas juntas híbridas coladas com este adesivo. A rotura da junta ocorreu primeiramente pelo adesivo e só depois pelo ponto de soldadura, tal como tinha ocorrido no adesivo Araldite® AV138. A resistência das juntas com o adesivo Araldite® 2015 foi bastante aproximada à

das juntas com o adesivo Araldite® AV138 para uma sobreposição de 15 mm. No entanto, o aumento de sobreposição traduziu-se num aumento bastante superior comparativamente às juntas com o adesivo Araldite® AV138.

Relativamente às juntas híbridas com o adesivo Sikaforce® 7752, estas mostraram, como era esperado, uma rotura coesiva em todas as juntas ($L_0 = 15$ e 30 mm). Como a resistência das juntas com o adesivo Sikaforce® 7752 é superior à observada para os dois outros adesivos, os aderentes vão sofrer deformações plásticas significativas, e este efeito é visível na Figura 37. A rotura das juntas iniciou-se pelo adesivo, o que provocou um decréscimo da força transmitida, e de seguida o aumento da força prolongou-se até ocorrer a rotura do ponto de soldadura. Usados os mesmos parâmetros de soldadura, para este adesivo não se observou carbonização significativa em redor do ponto de soldadura. A melhoria da resistência das juntas coladas para juntas híbridas foi bastante mais acentuada do que para as juntas com o adesivo Araldite® 2015.



Figura 37 - Superfícies de rotura dos provetes com $L_0 = 30$ mm para o adesivo Sikaforce® 7752 (juntas híbridas).

3.4.2 Curvas $P-\delta$

Assim como para os modos de rotura, o primeiro caso em estudo das curvas força-deslocamento ($P-\delta$) é referente às juntas coladas com os adesivos Araldite® AV138,

Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752. Na Figura 38 à Figura 40 estão representadas as curvas $P-\delta$ para os diferentes adesivos.

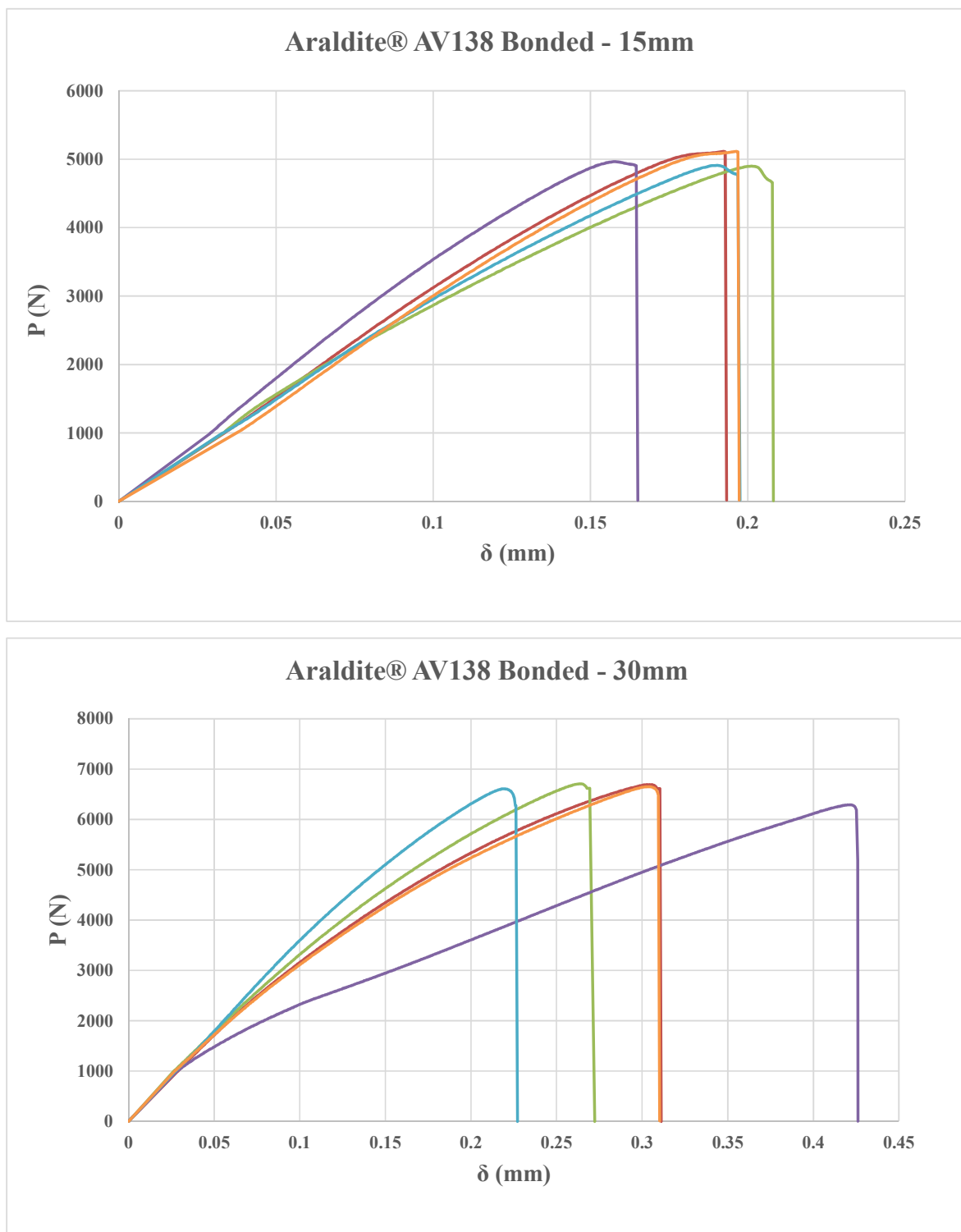


Figura 38 - Curvas $P-\delta$ obtidas experimentalmente utilizando o adesivo Araldite® AV138, para ligações coladas com $L_0 = 15$ mm e $L_0 = 30$ mm.

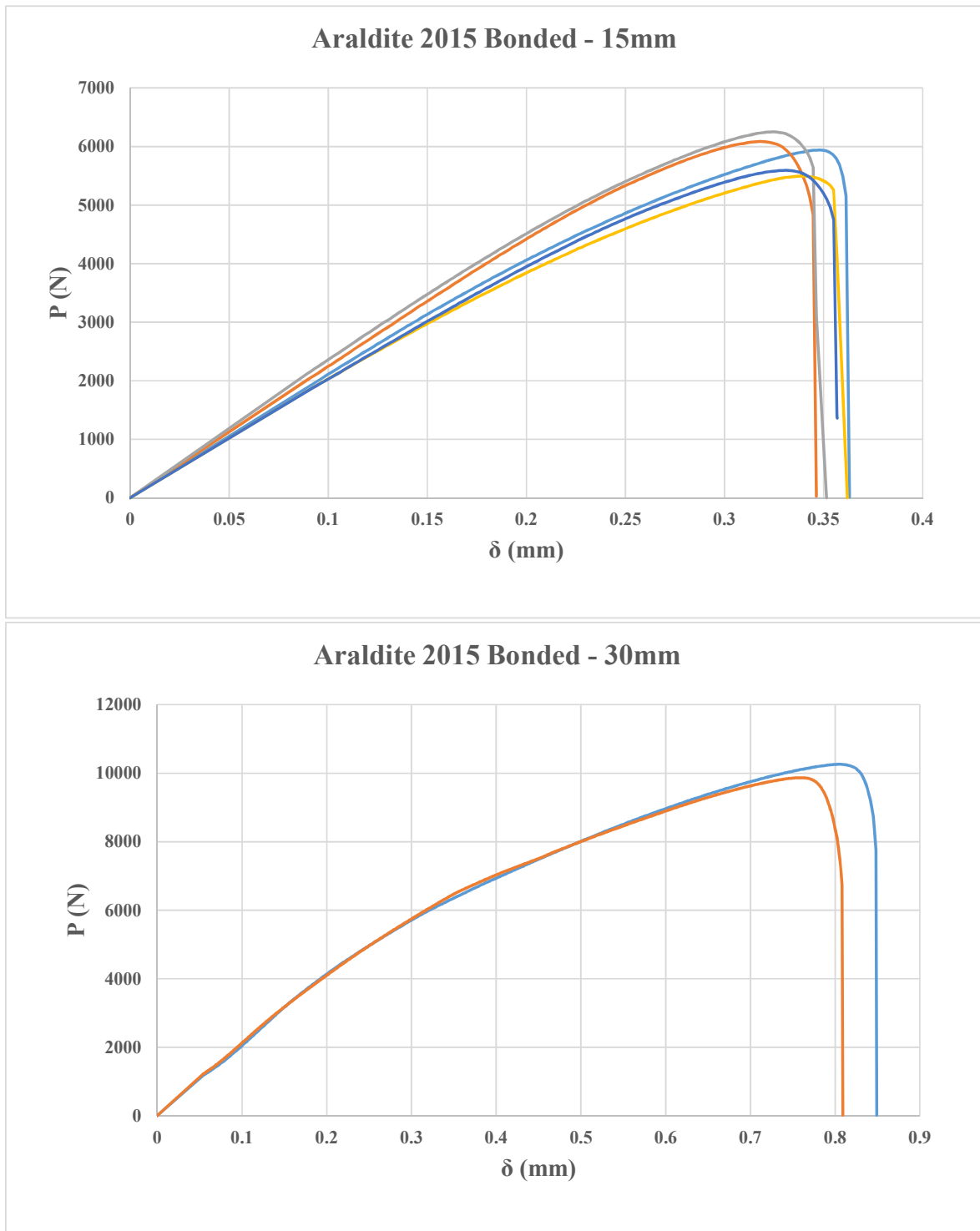


Figura 39 - Curvas P - δ obtidas experimentalmente utilizando o adesivo Araldite[®] 2015, para ligações coladas com $L_0 = 15$ mm e $L_0 = 30$ mm.

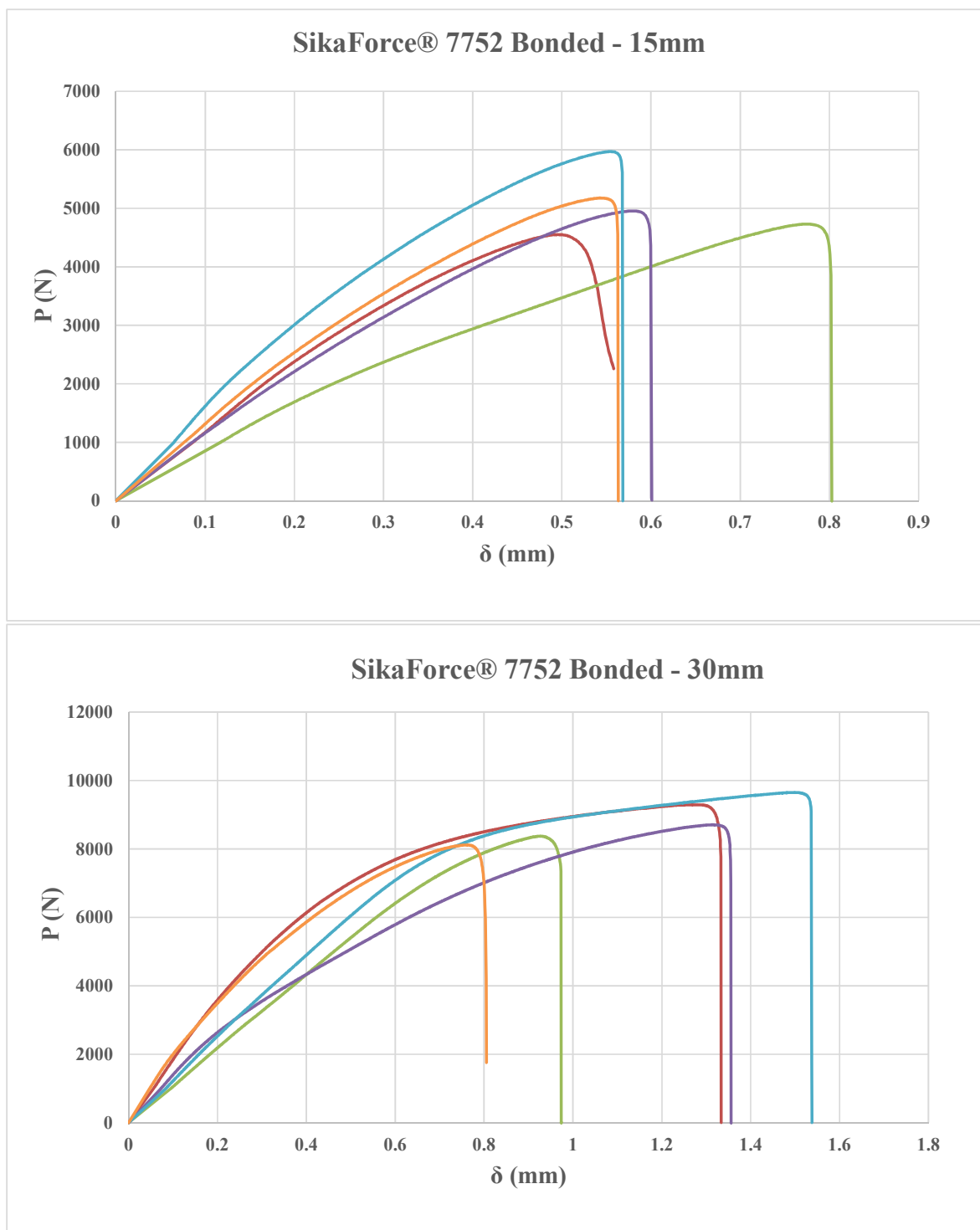


Figura 40 - Curvas P - δ obtidas experimentalmente utilizando o adesivo Sikaforce® 7752, para ligações coladas com $L_0 = 15$ mm e $L_0 = 30$ mm.

Na Figura 38, relativa às juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138, verifica-se o comportamento aproximadamente linear da junta até à rotura, e a ocorrência de pequenas oscilações na rigidez elástica das juntas devido à variabilidade natural entre provetes. De

salientar que no geral existe uma boa repetibilidade das curvas no que respeita à rigidez, carga máxima e deslocamento de rotura.

Da mesma forma ao observado para o adesivo Araldite® AV138, no adesivo Araldite® 2015 verifica-se um comportamento inicial linear, mas agora seguido de uma ligeira plastificação antes da rotura. Para $L_0 = 30$ mm é bem evidente a não linearidade das curvas $P-\delta$. Este comportamento não linear é devido à plasticidade que o adesivo possui, que leva à maior resistência das juntas e correspondente plastificação dos aderentes. Tal como no adesivo anterior, existe uma boa repetibilidade das curvas no que concerne à rigidez, $P_{m\acute{a}x}$ e respectivo deslocamento.

O adesivo Sikaforce® 7752 tem um comportamento não linear mais acentuado, como mostra a Figura 40, devido à elevada plasticidade que possui, o que uma vez induz plastificação nos substratos antes da ocorrência da rotura. Para o caso em que $L_0 = 30$ mm esta não linearidade é bem evidente, e tal comportamento reflecte-se no deslocamento de rotura notoriamente superior a todas as restantes condições. Tal como para os restantes adesivos, ocorrem pequenas oscilações na rigidez elástica das juntas devido à variabilidade natural entre provetes, embora a repetibilidade das curvas seja no geral bastante aceitável.

Tabela 6 - Variação de $P_{m\acute{a}x}$ dos três adesivos para diferentes valores de L_0 .

L_0 (mm)	15			30		
Tipo de junta	Colada			Colada		
Adesivo	AV 138	2015	SF 7752	AV 138	2015	SF 7752
$P_{m\acute{a}x}$ médio (N)	5000,4	5872,2	4854,1	6590,8	10064,4	8624,8
Desvio padrão	107	320,7	271,1	171,7	275,2	508,1
Aumento $P_{m\acute{a}x}$ [%]	-	-	-	31,8	71,4	77,7

Os valores de carga máxima ($P_{m\acute{a}x}$) aumentam com o aumento de L_0 , conforme se observa na Tabela 6. No caso dos adesivos dúcteis como o Araldite® 2015 e o Sikaforce® 7752 o

aumento L_0 de 15 mm para 30 mm traduziu-se num aumento bastantes significativo, mais precisamente $\approx 71,4\%$ e $\approx 77,7\%$, respectivamente, como apresenta a Tabela 6. Relativamente ao adesivo Araldite® AV138 o aumento não foi além dos $\approx 31,8\%$.

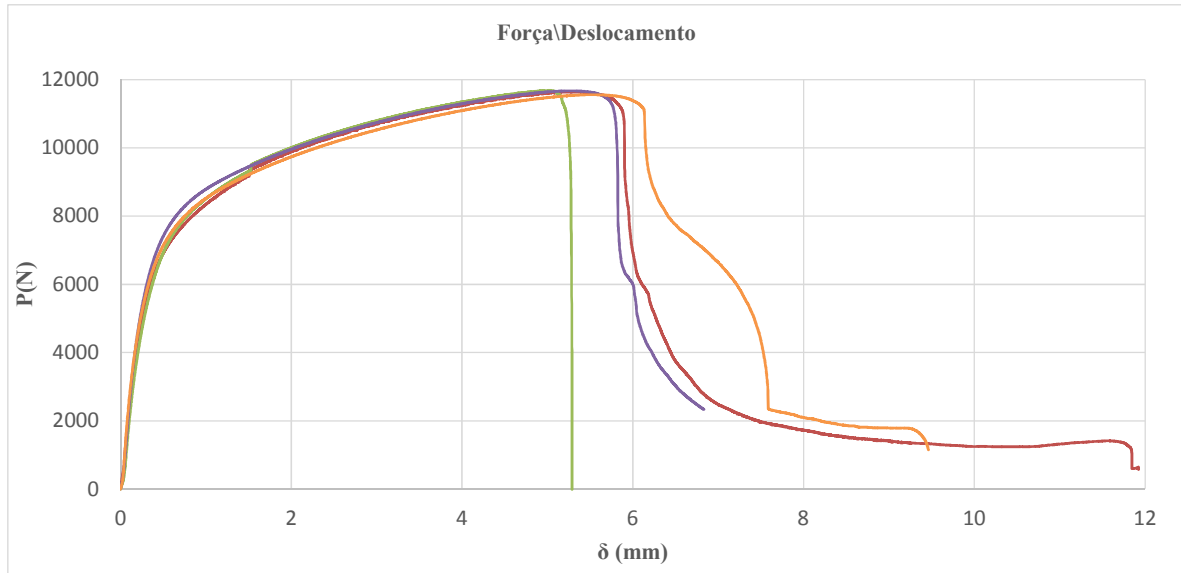


Figura 41 - Curvas $P-\delta$ obtidas experimentalmente utilizando soldadura por pontos.

A Figura 41 mostra as curvas $P-\delta$ dos ensaios realizados para juntas de sobreposição simples com um ponto de soldadura. Os parâmetros de soldadura utilizados foram retirados de trabalhos anteriores para material de substrato idêntico [53], e os mesmos foram utilizados para a ligação das juntas híbridas.

Da Figura 42 à Figura 44 apresentam as curvas $P-\delta$ das juntas híbridas com os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752, respectivamente, com L_0 diferentes.

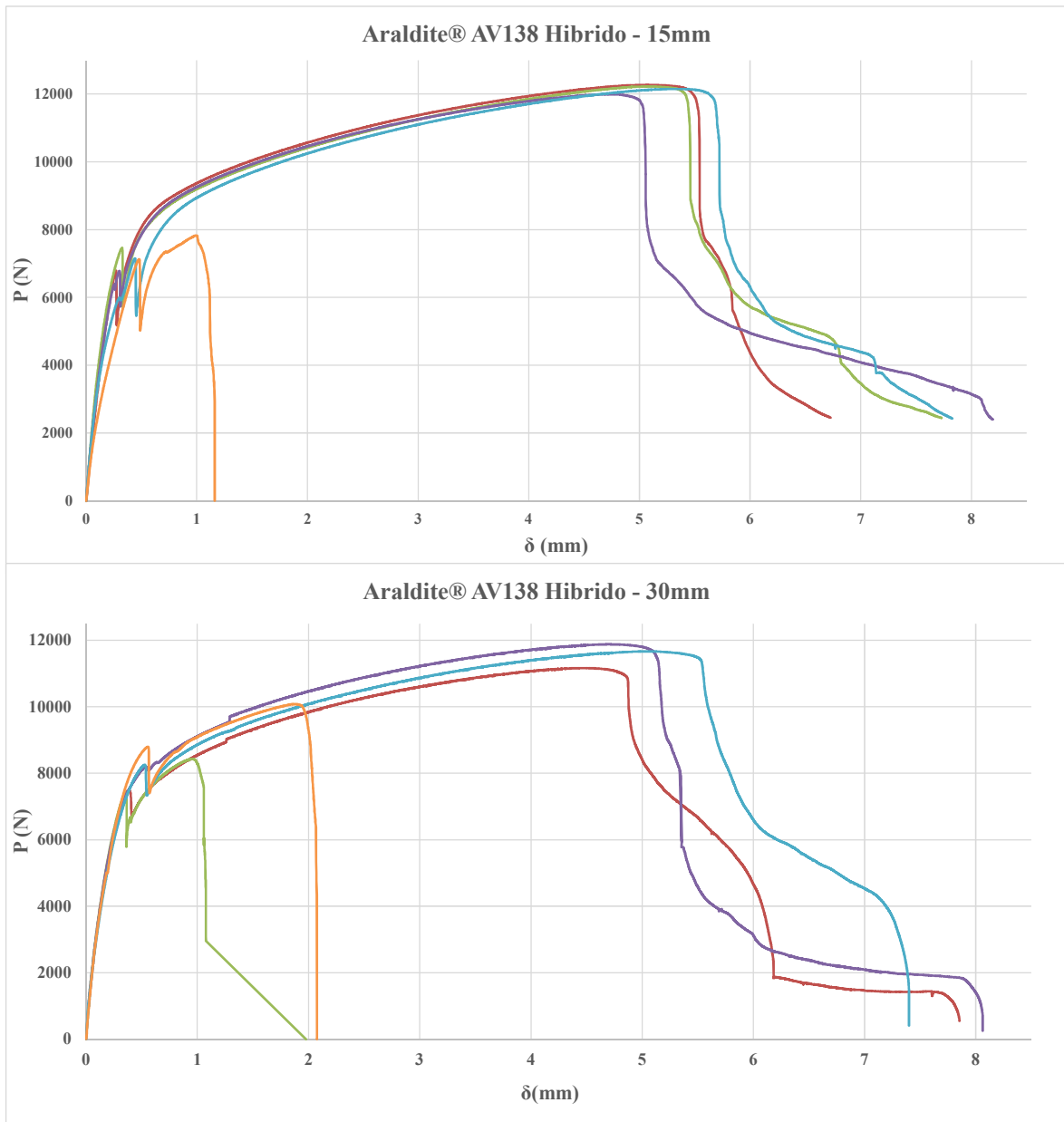


Figura 42 - Curvas P - δ obtidas experimentalmente utilizando o adesivo Araldite® AV138, para ligações híbridas com $L_0 = 15$ mm e $L_0 = 30$ mm.

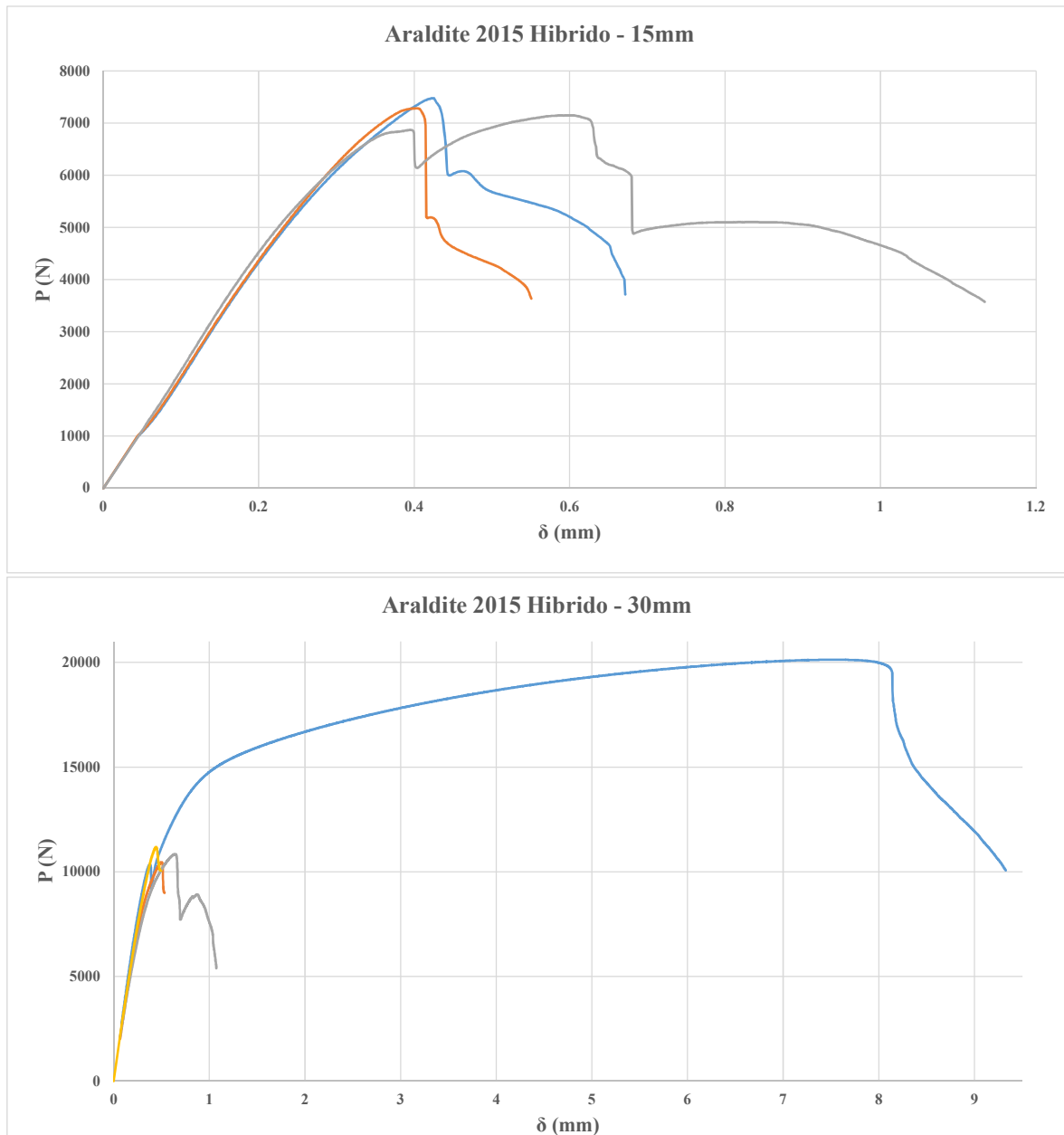


Figura 43 - Curvas $P-\delta$ obtidas experimentalmente utilizando o adesivo Araldite® 2015, para ligações híbridas com $L_0 = 15$ mm e $L_0 = 30$ mm.

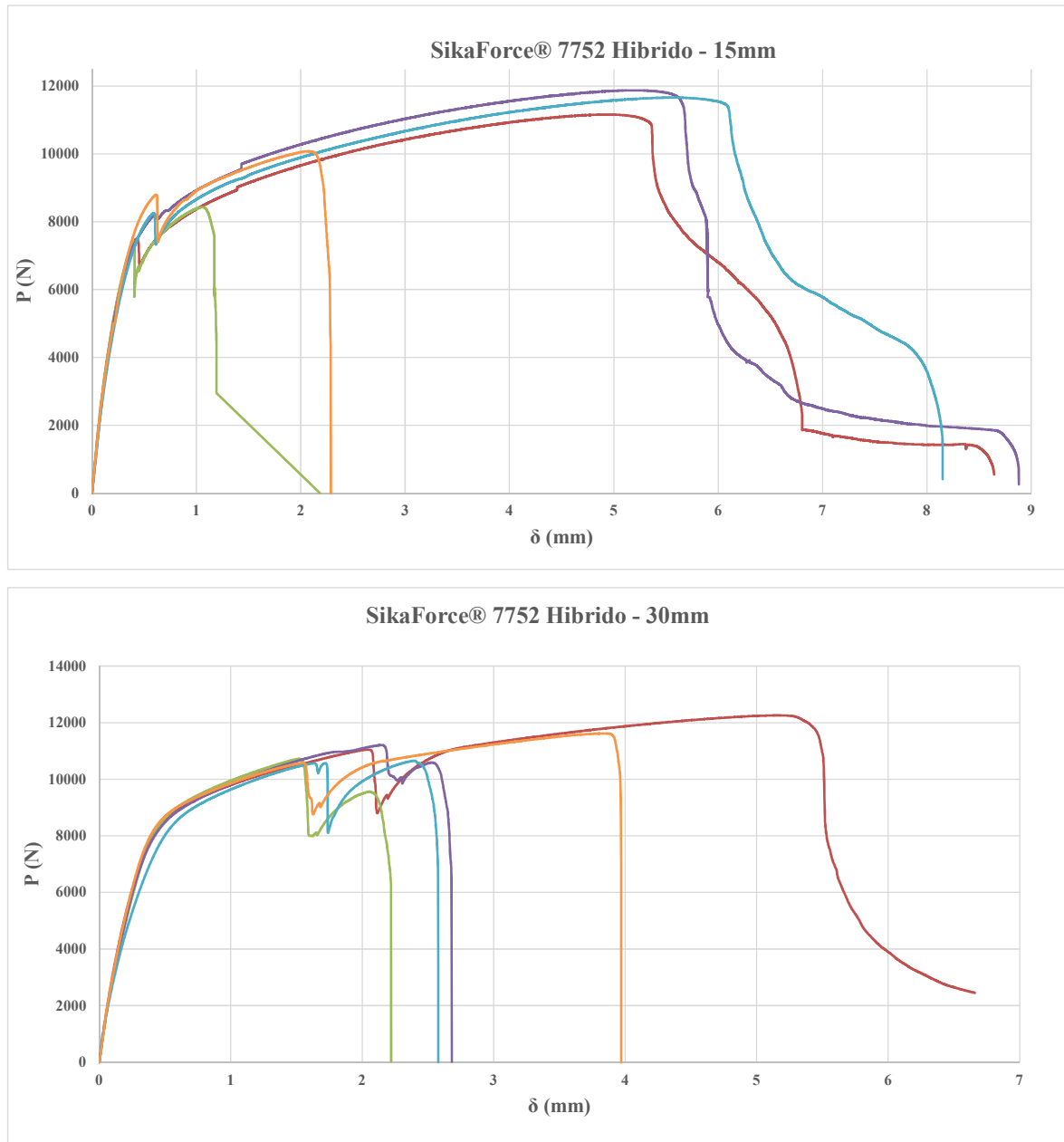


Figura 44 - Curvas P - δ obtidas experimentalmente utilizando o adesivo Sikaforce® 7752, para ligações híbridas com $L_0 = 15$ mm e $L_0 = 30$ mm.

Para efeitos de contabilização da resistência da junta ($P_{m\acute{a}x}$) considerou-se que esta ocorre na rotura do adesivo, o que corresponde à queda abrupta na curva P - δ , apesar de o *spot-weld* ainda conseguir transmitir esforços, mas com substancial perda da rigidez inicial da junta.

Pela análise dos resultados obtidos para as juntas com o adesivo Araldite® AV138, observou-se que a melhoria de junta colada para junta híbrida diminui substancialmente com o

aumento de L_0 . A rotura do adesivo teve origem no regime elástico da curva $P-\delta$ para $L_0 = 15$ mm. Para $L_0 = 30$ mm a rotura apresentou-se na transição do regime elástico para o plástico, como mostra a Figura 42. A rotura prematura do adesivo relativamente ao ponto de soldadura deve-se à fragilidade do mesmo, que não consegue acompanhar as elevadas deformações da junta proporcionadas pelo ponto de soldadura. A repetibilidade das curvas e dos valores de $P_{m\acute{a}x}$ foi bastante razoável para os dois valores de L_0 . Verifica-se também um comportamento linear da junta até à rotura do adesivo para $L_0 = 15$ mm, já para 30 mm a plasticidade dos substratos faz-se notar de forma muito ligeira.

No caso dos adesivos dúcteis (Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752), observou-se que a rotura da camada de adesivo, ainda de forma prematura relativamente ao ponto de soldadura, ocorreu para cargas superiores relativamente ao adesivo Araldite® AV138. Esta diferença fez com que, nestes casos, a plastificação dos substratos tenha afectado negativamente a resistência da camada adesiva. Conforme será detalhado posteriormente, o aumento percentual de resistência destas juntas pela junção do ponto de soldadura à camada de adesivo foi inferior nalguns casos relativamente ao adesivo Araldite® AV138, o que não seria de esperar caso não tivesse ocorrido a plastificação dos aderentes, pois adesivos dúcteis permitem acompanhar de forma mais efectiva as deformações transversais da junta proporcionadas pelo ponto de soldadura. Tal como no Araldite® AV138, existe uma boa repetibilidade das curvas no que concerne à rigidez plástica e $P_{m\acute{a}x}$. Nas juntas híbridas com o adesivo Sikaforce® 7752, especialmente para $L_0 = 30$ mm, observou-se um comportamento não linear das curvas $P-\delta$ antes da rotura do adesivo devido à plasticidade que estes adesivos possuem e acomodação de deformações superiores das juntas. A rotura no adesivo Araldite® 2015 ocorreu após alguma plastificação dos substratos, embora a um grau inferior relativamente ao adesivo Sikaforce® 7752.

Embora a diferentes níveis, dependendo do adesivo utilizado, o ponto de soldadura veio trazer mais resistência à junta, aumentando assim o seu $P_{m\acute{a}x}$. Na Tabela 7 pode-se verificar essa variação para os diferentes casos, incluindo também os valores relativos às juntas coladas para efeitos de comparação. Neste caso, o aumento percentual diz respeito à diferença entre as juntas híbridas e juntas coladas correspondentes.

Tabela 7 - Variação de $P_{m\acute{a}x}$ dos três adesivos para L_0 diferentes, comparando entre juntas coladas e juntas híbridas.

L_0 (mm)	15						30					
Tipo de junta	Colada			Híbrida			Colada			Híbrida		
Adesivo	AV 138	2015	SF 7752	AV 138	2015	SF 7752	AV 138	2015	SF 7752	AV 138	2015	SF 7752
$P_{m\acute{a}x}$ médio (N)	5000,4	5872,2	4854,1	7059,1	7211,5	8214,7	6590,8	10064,4	8624,8	8031,4	10709,2	10820,8
Desvio padrão	107,0	320,7	271,1	284,8	311,1	573,2	171,7	275,2	508,1	573,2	376,3	290,4
Aumento $P_{m\acute{a}x}$ [%]	-	-	-	41,2	22,8	69,2	-	-	-	21,9	6,4	25,5

Para uma melhor percepção da resistência das juntas, tanto para $L_0 = 15$ mm como para $L_0 = 30$ mm, a Figura 45 e Figura 46 mostra os valores de $P_{m\acute{a}x}$ entre juntas coladas e híbridas, bem como a resistência da junta soldada como ponto de referência.

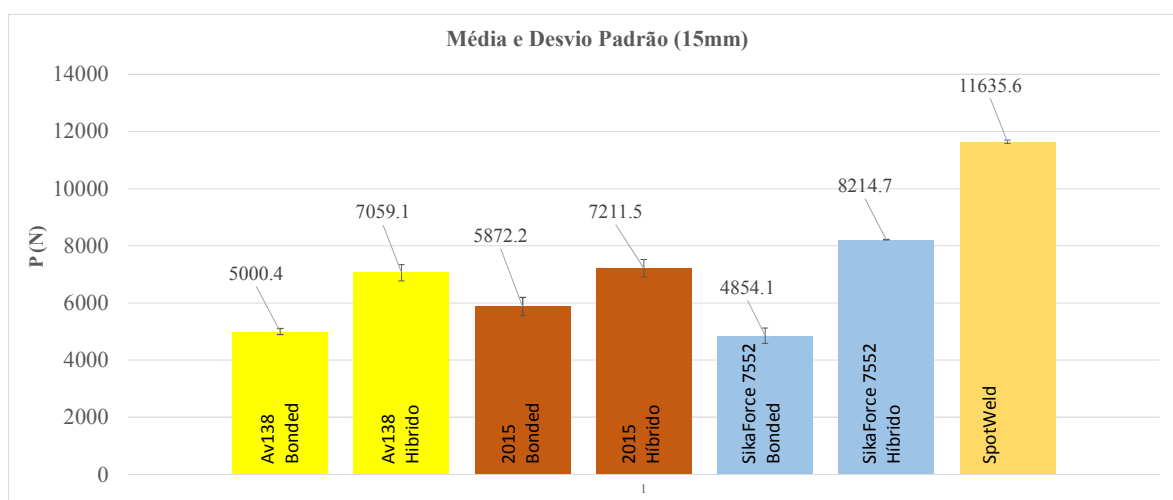


Figura 45 - Valores experimentais de $P_{m\acute{a}x}$ média para a configuração $L_0 = 15$ mm.

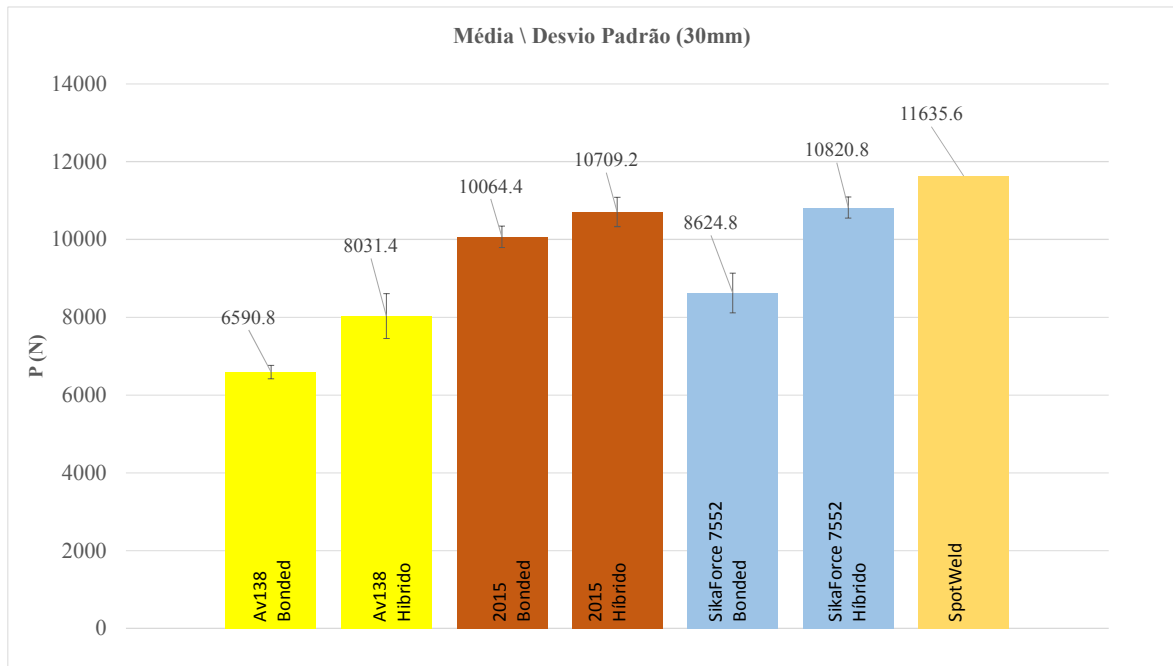


Figura 46 - Valores experimentais de $P_{m\acute{a}x}$ média para a configuração $L_0 = 30$ mm.

Depois da realização dos ensaios experimentais confirma-se que, para as juntas coladas, o aumento da $P_{m\acute{a}x}$ com L_0 varia consoante o adesivo, como mostra a Figura 45 e Figura 46. Os resultados de $P_{m\acute{a}x}$ são bastante dependentes das propriedades dos adesivos, tais como rigidez, resistência e ductilidade. Por outro lado, conforme referido anteriormente, a plastificação dos substratos ocorrida para as juntas com os adesivos Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752, devido aos maiores esforços envolvidos, também afectaram os valores obtidos de $P_{m\acute{a}x}$.

Para o adesivo Araldite® AV138, o aumento percentual de $P_{m\acute{a}x}$ de junta colada para junta híbrida é bastante aceitável. O aumento percentual varia entre os 41,2% ($L_0 = 15$ mm) e 21,9% ($L_0 = 30$ mm), ou seja, a melhoria com a introdução do ponto de soldadura diminui com o aumento de L_0 . Para a junta híbrida com $L_0 = 30$ mm o $P_{m\acute{a}x}$ é de 8031,41 N, enquanto para as juntas coladas correspondentes é de 6590,8 N. Observa-se que o valor de $P_{m\acute{a}x}$ para as juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015 é ligeiramente superior ao adesivo Araldite® AV138 para $L_0 = 15$ e 30 mm. Para além deste facto, com o aumento de L_0 , esta diferença tem tendência a acentuar-se devido à ductilidade superior do Araldite® 2015. O aumento percentual para o adesivo Araldite® 2015 entre junta adesiva e híbrida é bastante inferior ao observado para o adesivo Araldite® AV138, mais especificamente 22,8% para $L_0 = 15$ mm e 6,4% para $L_0 = 30$ mm. O valor de $P_{m\acute{a}x}$ para $L_0 = 30$ mm é de 10709,2 N

para junta híbrida e 10064,4 N para junta colada. Conforme referido anteriormente, seria de esperar um aumento superior ao adesivo Araldite® AV138. No entanto, devido à plastificação dos substratos decorrentes das forças superiores envolvidas provocou a plastificação dos substratos antes da rotura do adesivo, o que afectou negativamente a resistência das juntas. O adesivo Sikaforce® 7752 teve um aumento percentual bastante superior comparativamente ao observado com os adesivos Araldite® 2015 e Araldite® AV138, nomeadamente relativamente ao primeiro destas. Para $L_0 = 15$ mm, a diferença entre juntas coladas e híbridas foi cerca de 69,2%, já para $L_0 = 30$ mm o aumento ronda os 25,5%. O valor médio de $P_{máx}$ que este adesivo representa para $L_0 = 30$ mm é de 8624,8 N para junta colada e 10820,8 N para junta híbrida. Apesar de também se ter verificado plastificação dos substratos, devido à grande capacidade de plastificação deste adesivo, aliás muito superior aos restantes, a plastificação não prejudicou de forma significativa a resistência das juntas, como tinha ocorrido com o adesivo Araldite® 2015.

4 Trabalho numérico

Neste capítulo foi efectuada uma abordagem das condições de análise numérica impostas no *software* ABAQUS® para o método MDC e realizada uma análise de tensões de corte e de arrancamento das juntas para os diferentes adesivos e valores de L_0 usados. É também discutida a determinação das propriedades coesivas dos adesivos considerados, necessárias para a modelação numérica. No final, para cada condição estudada, é feita uma comparação dos valores de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos numericamente com os obtidos experimentalmente, e apresentada uma discussão detalhada dos resultados obtidos em função da análise de tensões realizada e características dos adesivos.

4.1 Condições da análise numérica

A análise pelo MEF foi realizada no ABAQUS®, considerando elementos formulados com não linearidades geométricas, com o objectivo de avaliar a capacidade dos MDC para prever o comportamento das juntas em análise. Os modelos tridimensionais (3D) foram construídos utilizando condições longitudinais de simetria de tal forma que apenas se modelou metade da largura da junta (Figura 47).

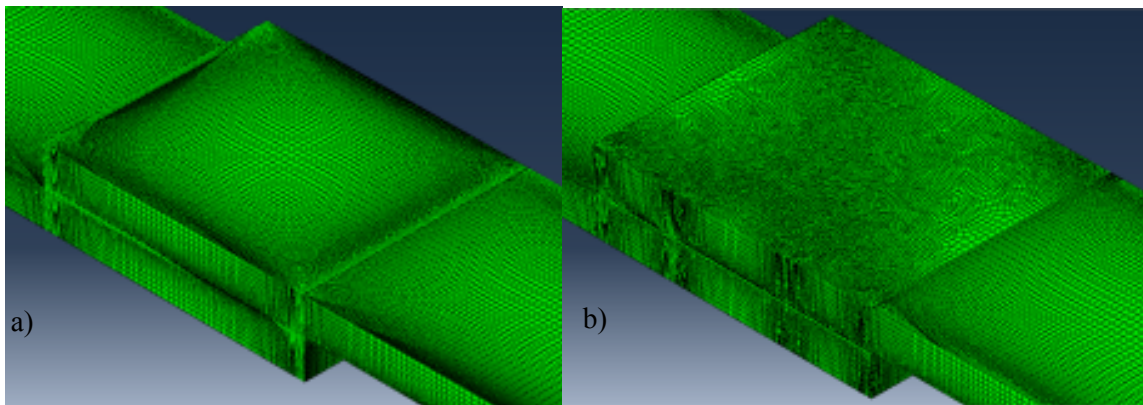


Figura 47 - Detalhe da malha na zona de ligação para os modelos de junta adesiva a) e junta híbrida b), ambos com $L_0 = 15$ mm.

Para a análise de tensões foram utilizados elementos sólidos de 8 nós para todos os constituintes dos modelos (C3D8 do ABAQUS®). Para a análise de resistência foram considerados elementos sólidos de 8 nós de integração reduzida para diminuição do esforço computacional (C3D8R do ABAQUS®) e elementos coesivos de 8 nós (COH3D8) para modelar o adesivo e ponto de soldadura. A Figura 47 mostra os refinamentos típicos de malha para as juntas adesivas (a) e híbridas (b) e com $L_0 = 15$ mm para a análise de tensões, evidenciando maior refinamento na periferia do ponto de soldadura (quanto aplicável) e extremidades da sobreposição, devido às concentrações de tensões existentes nestes locais [64]. As juntas foram encastradas numa das extremidades, enquanto a extremidade oposta foi restringida verticalmente e sujeita a um deslocamento de tracção, como mostra a Figura 48. A face lateral do provete que corresponde ao plano longitudinal de simetria da junta foi restringida na direcção fora do plano para aplicação da respectiva simetria. A camada de adesivo foi modelada por uma única fila de elementos coesivos baseados num modelo triangular de tracção-separação, apresentado no capítulo seguinte. A formulação proposta inclui um modelo de propagação de dano em modo misto, para ter em conta o efeito conjunto dos esforços de arrancamento e de corte, tal como definido mais adiante neste trabalho. O ponto de soldadura foi modelado de forma idêntica, considerando-se uma zona com espessura de 0,2 mm colinear com a camada de adesivo para promover a sua rotura, enquanto a zona de aço circundante foi modelada com propriedades elasto-plásticas que traduzem o comportamento definido na Figura 22. Esta escolha foi feita apesar do gradiente contínuo das propriedades do aço desde as zonas não afectadas termicamente até à zona da soldadura, para simplificação dos modelos [64].

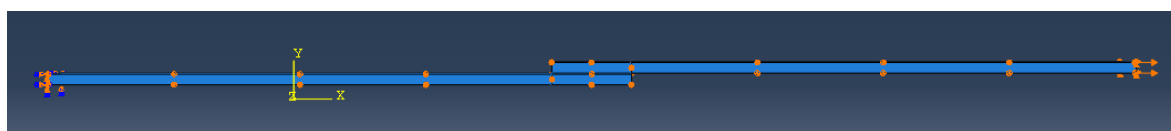


Figura 48 - Condições fronteira e de carregamento impostas nos modelos numéricos.

Ao longo da junta adesiva existe uma variação das dimensões da malha, na qual esta é mais refinada na zona da camada adesiva e nas proximidades. Foi considerado um refinamento superior para os modelos utilizados para obtenção das distribuições das tensões (Figura 47) comparando com os modelos para previsão de rotura, no sentido de obter uma maior

precisão, nomeadamente nas zonas de gradientes elevados (nestes modelos consideraram-se elementos de dimensões 0,02 mm por 0,02 mm nas extremidades da sobreposição). Esta variação conforme a região da junta é apresentada na Tabela 8 para juntas adesivas e Tabela 9 para juntas híbridas, considerando as malhas para o estudo das tensões. Para o estudo de resistência, o refinamento seguiu a mesma metodologia de gradação do tamanho dos elementos, mas com menor número de elementos. Por exemplo, na extremidade da sobreposição, os elementos coesivos do adesivo apresentam dimensões de 0,2 mm por 0,2 mm. As linhas a vermelho são referentes às arestas nas quais foi definido um controlo de malha. A atribuição do número de elementos e do *bias ratio* (rácio de refinamento crescente ao longo de uma aresta do modelo) são dependentes do valor de L_0 da junta e foram considerados pela necessidade de obter uma precisão elevada dos valores obtidos.

Tabela 8 - Variação do número de elementos da malha nas juntas adesivas.

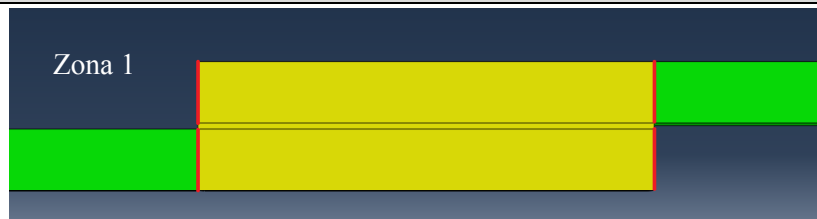
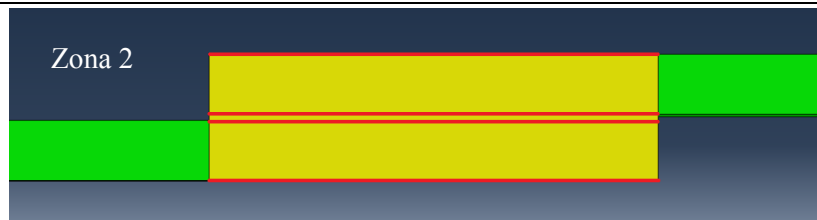
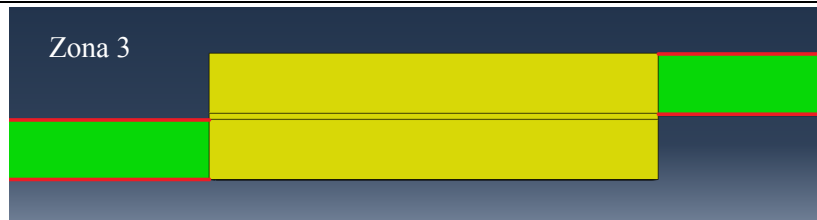

Junta JSS adesiva		L_0	Número de elementos	<i>Bias ratio</i>
 Zona 1	15	15	6	
	30	15	6	
	45	15	6	
	60	15	6	
 Zona 2	15	130	15	
	30	200	15	
	45	250	20	
	60	380	22	
 Zona 3	15	120	30	
	30	120	30	
	45	120	30	
	60	120	30	
 Zona 4	15	100	15	
	30	100	15	
	45	100	15	
	60	100	15	

Tabela 9 - Variação do número de elementos da malha nas juntas híbridas.

Junta JSS adesiva		L_0	Número de elementos	Bias ratio
		15	15	6
		30	15	6
		45	15	6
		60	15	6
		15	80	6
		30	100	15
		45	160	16
		60	150	30
		15	80	8
		30	80	8
		45	80	8
		60	80	8
		15	120	30
		30	120	30
		45	120	30
		60	120	30
		15	100	15
		30	100	15
		45	100	15
		60	100	15
		15	100	-
		30	100	-
		45	100	-
		60	100	-
		15	160	10
		30	200	18
		45	270	25
		60	350	27

As malhas foram construídas com um maior refinamento nas extremidades da junta, na direcção da camada de adesivo, para representar com precisão os gradientes de tensão esperados nessas regiões. Este processo foi realizado no ABAQUS® através da criação de “sementes” com espaçamentos pré-definidos, nas arestas dos modelos, e que serviram de base à geração da malha. Na Figura 49 pode-se visualizar com mais detalhe as direcções definidas na Tabela 8 para refinamento da malha.

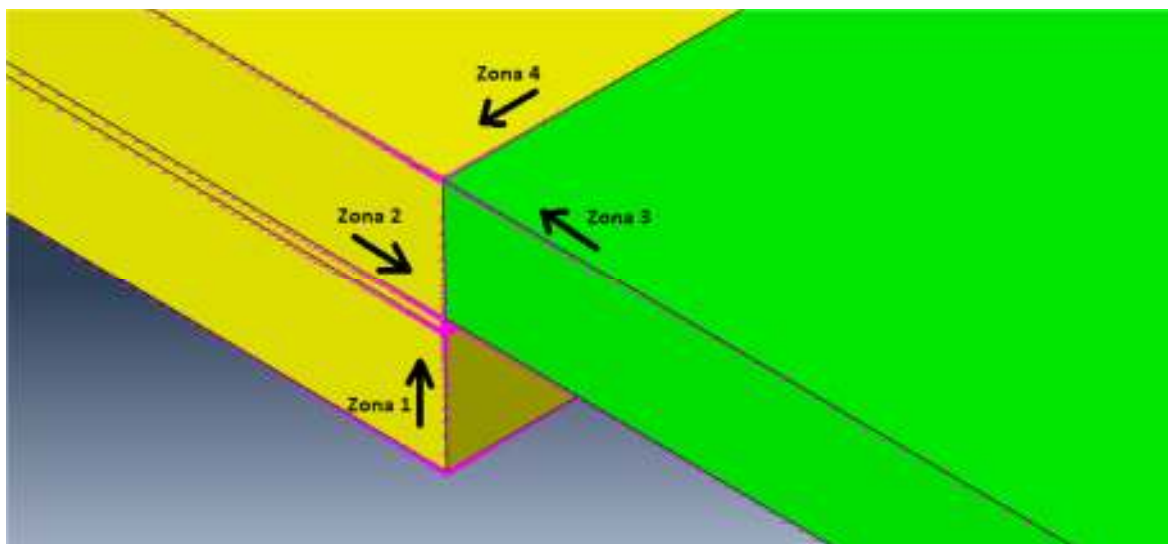


Figura 49 - Pormenor das direcções do refinamento da malha na zona do adesivo (juntas adesivas).

A Zona 1 corresponde à espessura dos substratos, na qual o refinamento é mais acentuado na direcção do adesivo, a Zona 2 corresponde ao comprimento da camada de adesivo, que apresenta um maior refinamento na proximidade das extremidades da sobreposição, a Zona 3 refere-se ao comprimento do substrato, com gradação de tamanho no sentido da extremidade da sobreposição, e a Zona 4 corresponde à largura do substrato, com aumento do refinamento do centro para as extremidades.

O refinamento da malha para a junta híbrida teve de ser redefinido devido ao ponto de soldadura presente na junta. A Figura 50 mostra em detalhe os sentidos de refinamento para esta junta.

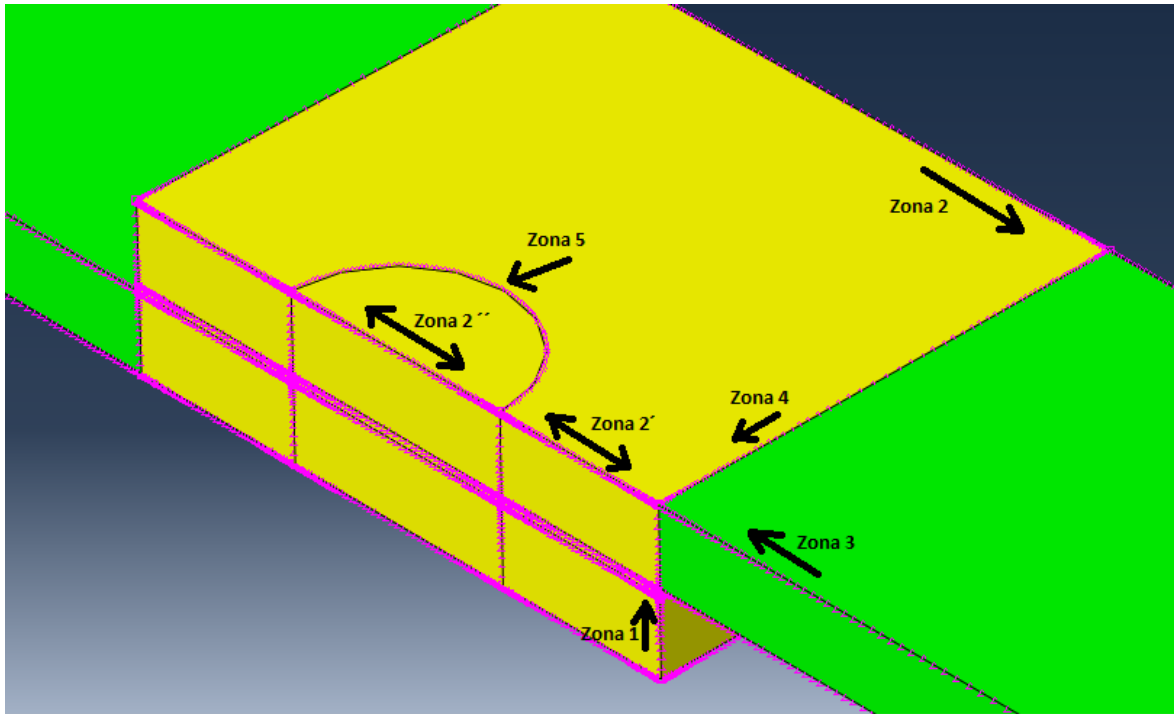


Figura 50 - Pormenor da direcção do refinamento da malha na zona do adesivo e no ponto de soldadura (juntas híbridas).

Conforme se observa, nas juntas híbridas foi necessário dividir por mais zonas o refinamento da malha. Na Zona 2, Zona 2' e Zona 2'', a gradação da malha parte do centro para maior refinamento nas extremidades. A Zona 5 refere-se ao perímetro do ponto de soldadura, onde o número de elementos é distribuído uniformemente. As Zonas 1, 3 e 4 foram refinadas seguindo os princípios expostos anteriormente para as juntas adesivas.

4.2 Modelo de dano coesivo

Como falado anteriormente, os MDC baseiam-se numa relação entre tensões e deslocamentos que ligam nós homólogos dos elementos coesivos, de forma a simular o comportamento elástico do material até à resistência máxima e subsequentemente degradação das propriedades dos materiais até à rotura.

4.2.1 Modelo de dano triangular

A lei de dano triangular, ver Figura 16, assume inicialmente um comportamento linear elástico, seguido de degradação linear. O comportamento elástico é definido por uma matriz constitutiva (\mathbf{K}) que contém os parâmetros de rigidez, e relaciona as tensões e deformações em tracção e corte ao longo dos elementos coesivos (subscritos n e s, respectivamente).

$$\mathbf{t} = \begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{nn} & K_{ns} \\ K_{ns} & K_{ss} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \varepsilon_n \\ \varepsilon_s \end{Bmatrix} = \mathbf{K}\boldsymbol{\varepsilon}. \quad (1)$$

Para camadas finas de adesivo, uma aproximação viável é dada por $K_{nn} = E$, $K_{ss} = G$ e $K_{ns} = 0$. A iniciação do dano pode ser especificada por diferentes critérios. Neste trabalho, foi considerado o critério quadrático de tensões que se segue para a iniciação do dano, por já ter sido provada a sua fiabilidade [65], sendo dado por

$$\left\{ \frac{\langle t_n \rangle}{t_n^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_s}{t_s^0} \right\}^2 = 1. \quad (2)$$

$\langle \rangle$ são os parêntesis de Macaulay, que indicam que um estado de tensão puramente compressivo não contribui para a iniciação do dano. Depois de atingida a resistência máxima em modo misto (t_n^0 na Figura 16), através da equação anterior, a rigidez do material é degradada. A separação completa é prevista por um critério linear energético da forma:

$$\frac{G_n}{G_n^c} + \frac{G_s}{G_s^c} = 1. \quad (3)$$

4.2.2 Determinação das propriedades coesivas

De modo a caracterizar as leis coesivas em tracção e corte, é necessário conhecer t_n^0 , t_s^0 , G_n^c e G_s^c (Figura 16). No passado foram publicados alguns estudos que por aproximação assumiam que estes parâmetros eram idênticos aos obtidos para ensaios em adesivo maciço [66-68]. No entanto, a restrição às deformações na camada do adesivo provocada pelos substratos neste tipo de geometrias, e propagação de fenda tipicamente em modo misto, levam a que haja uma diferença entre as propriedades do adesivo como material maciço e como camada fina [69-71]. Assim sendo, é necessária a utilização de métodos de definição destes valores que traduzam o comportamento dos adesivos nas condições em que estes vão ser utilizados. Para o adesivo Araldite® 2015, as leis coesivas da camada de adesivo foram

determinadas em trabalhos anteriores [72, 73] por um método inverso para a determinação de t_n^0 e t_s^0 . Nestes trabalhos é apresentada uma descrição mais detalhada desta metodologia, que basicamente consiste na determinação de G_n^c e G_s^c através de ensaios *Double cantilever beam* (DCB) e *End-notched flexure* (ENF), respectivamente, usando um método ou teoria apropriados para a sua obtenção. O valor de G_n^c ou G_s^c é então utilizado para construção de uma lei coesiva no modo puro correspondente, que inicialmente tem um valor aproximado de t_n^0 ou t_s^0 , estimado em função das características do adesivo. A lei coesiva obtida é utilizada no modelo numérico correspondente (DCB para tracção ou ENF para corte) com as mesmas dimensões do modelo a ser simulado. O valor de t_n^0 ou t_s^0 é então definido utilizando um procedimento de ajuste entre as curvas $P-\delta$ numéricas e experimentais do teste respectivo de caracterização à fractura, para que a lei coesiva estimada permita reproduzir fielmente o comportamento observado da camada de adesivo. A Tabela 10 apresenta os parâmetros utilizados para simular a camada de adesivo Araldite® 2015 numa lei coesiva em modo misto. Os valores de E e G , módulo de elasticidade em tensão e corte da camada de adesivo respectivamente, foram determinados experimentalmente com ensaios de adesivo maciço e ensaios de corte (TAST – *Thick adherend shear test*), respectivamente [74].

Tabela 10 - Parâmetros coesivos em tracção e corte para uma camada de adesivo de Araldite® 2015 com uma espessura de 0,2 mm.

E [MPa]	1850	G [MPa]	650
t_n^0 [MPa]	23,0	t_s^0 [MPa]	22,8
G_n^c [N/mm]	0,43	G_s^c [N/mm]	4,7

Tal como no caso anterior, para a determinação das leis coesivas para o adesivo Araldite® AV138 foi utilizado um método inverso, descrito em detalhe no trabalho de Campilho et al. [75]. No entanto, devido à não existência de ensaios de caracterização à fractura, o procedimento seguido foi ligeiramente diferente. Foram utilizados os valores de resistência à tracção e corte através de ensaios em adesivo maciço e ensaio de corte TAST para a definição de t_n^0 e t_s^0 , respectivamente. Estes valores foram utilizados para a construção de leis coesivas aproximadas, utilizando inicialmente valores típicos de G_n^c e G_s^c para adesivos frágeis. As leis obtidas para tracção e corte foram utilizadas no modelo numérico para uma das geometrias testadas (a junta de sobreposição simples com L_0 de 20 mm), e as leis do

adesivo foram estimadas de forma idêntica ao caso anterior por ajuste das curvas $P-\delta$ numéricas e experimentais. Os valores obtidos foram subsequentemente aplicados a todas as configurações testadas com resultados bastante satisfatórios. Os valores de E e G foram determinados experimentalmente com ensaios de adesivo maciço e ensaios de corte (TAST). Noutro trabalho [76] conclui-se que os parâmetros obtidos reproduzem de forma fiel as propriedades dos adesivos. A Tabela 11 apresenta os parâmetros utilizados para simular a camada de adesivo Araldite® AV138 numa lei coesiva em modo misto.

Tabela 11 - Parâmetros coesivos em tracção e corte para uma camada de adesivo Araldite® AV138 com uma espessura de 0,2 mm.

E [MPa]	4890	G [MPa]	1560
t_n^0 [MPa]	39,45	t_s^0 [MPa]	30,2
G_n^c [N/mm]	0,2	G_s^c [N/mm]	0,38

O processo de obtenção de propriedades coesivas para o adesivo Sikaforce® 7752 seguiu um processo algo idêntico ao utilizado para o Araldite® 2015. De facto, para a determinação da lei coesiva ao corte, foi seguido um método inverso idêntico, correspondente à determinação do valor de G_s^c por ensaio de fractura ENF, seguido de ajuste iterativo manual para a estimativa de t_s^0 [77]. Os valores utilizados neste trabalho são os valores médios de t_s^0 e G_s^c obtidos na referência [77], cujo desvio entre provetes foi bastante reduzido, traduzindo a repetibilidade dos ensaios efectuados. Por outro lado, para a lei coesiva em tracção, devido à inexistência, até à data, de procedimento inverso, foi seguido um processo distinto. O valor de G_n^c foi obtido por ensaios de fractura DCB [61], nomeadamente o valor médio de uma série de ensaios. O valor de t_n^0 foi aproximado ao valor médio de resistência à tracção de provetes maciços ensaiados no mesmo trabalho [72]. Como foi definido em trabalhos anteriores que, no caso particular de solicitação à tracção, o valor de t_n^0 não tem influência digna de registo para variações de t_n^0 até 25% do valor obtido por método inverso (variação para os 2 sentidos) [72], não foi considerado relevante neste trabalho a realização do dito procedimento. Os valores de E e G foram obtidos experimentalmente com ensaios de adesivo maciço e ensaios de corte (TAST) [61]. A Tabela 12 mostra os valores utilizados nos modelos numéricos para simular a camada de adesivo Sikaforce® 7752 numa lei coesiva em modo misto.

Tabela 12 - Parâmetros coesivos em tracção e corte para uma camada de adesivo Sikaforce® 7752 com uma espessura de 0,2 mm.

E [MPa]	493,81	G [MPa]	37,49
t_n^0 [MPa]	12,25	t_s^0 [MPa]	10,50
G_n^c [N/mm]	2,36	G_s^c [N/mm]	5,56

4.3 Análise de tensões

A análise de tensões das juntas adesivas e híbridas baseia-se no estudo das tensões de arrancamento (σ_y) e de corte (τ_{xy}) ao longo da camada de adesivo durante a parte elástica do carregamento, e é realizada no plano médio da espessura do adesivo, que se considera representativo do estado de tensão no adesivo, embora se saiba que existem concentrações de tensões próximas da interface com os aderentes. Estas distribuições de tensões exibem picos nas extremidades da sobreposição, que são responsáveis por início do dano prematuro nas juntas, pelo que é de extrema importância o seu estudo para a explicação dos resultados de resistência obtidos.

4.3.1 Juntas coladas

As distribuições de tensões σ_y e τ_{xy} em função de L_0 são dadas pela Figura 51 à Figura 53 e Figura 54 à Figura 56, respectivamente. De notar que todas as curvas referentes à análise de tensões das várias configurações de junta estão normalizadas relativamente ao comprimento de sobreposição (x/L_0). Os valores de σ_y e τ_{xy} estão também normalizados relativamente à tensão de corte média (τ_{avg}) para cada L_0 , para uma mais fácil comparação entre as diferentes configurações de junta. De uma maneira geral verifica-se que as tensões σ_y possuem uma magnitude inferior às tensões τ_{xy} , com excepção de zonas muito localizadas nas extremidades da ligação da junta, nas quais existem singularidades devido à geometria em esquina viva.

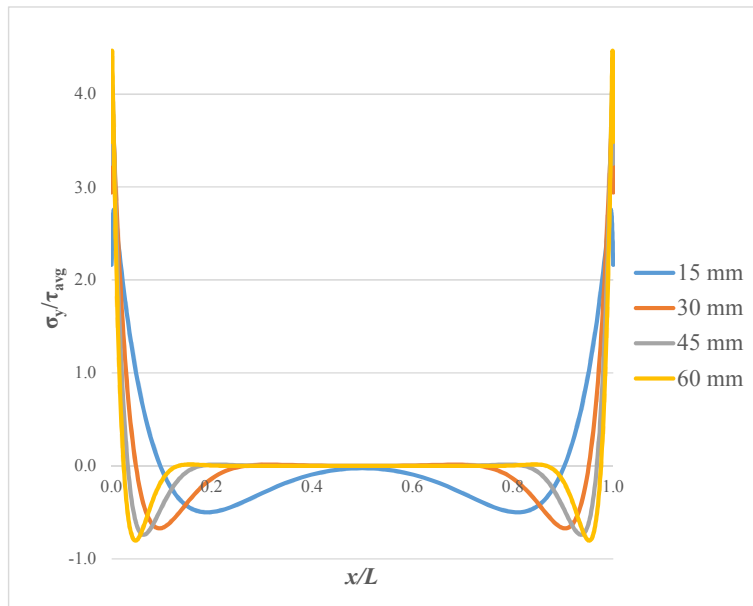


Figura 51 - Distribuição de tensões σ_y a meio da espessura do adesivo em função de L_0 para as juntas coladas (Araldite® AV138).

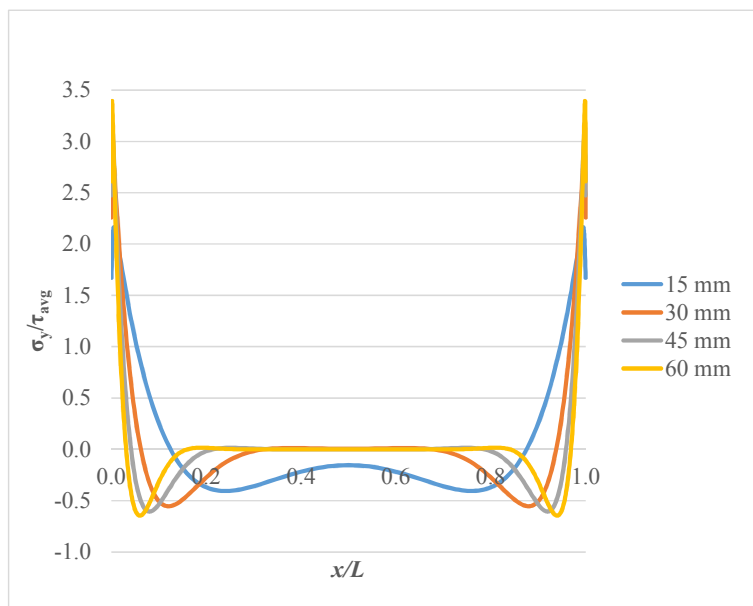


Figura 52 - Distribuição de tensões σ_y a meio da espessura do adesivo em função de L_0 para as juntas coladas (Araldite® 2015).

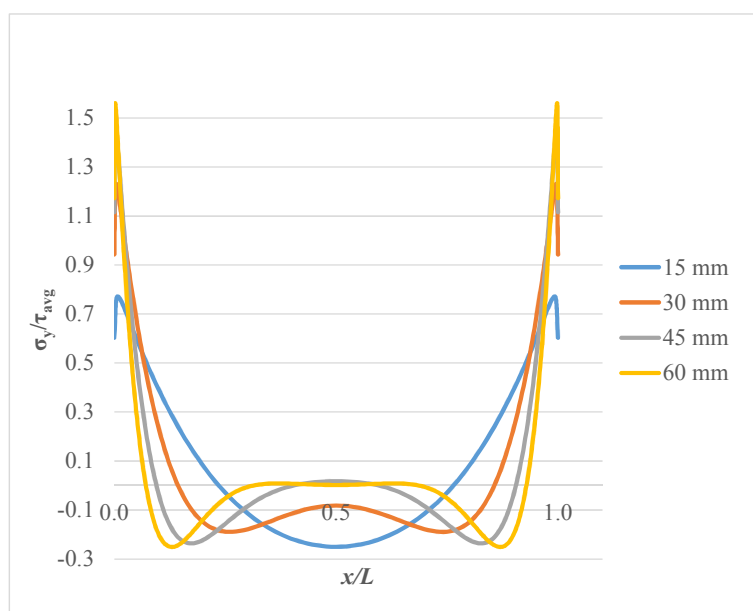


Figura 53 - Distribuição de tensões σ_y a meio da espessura do adesivo em função de L_0 para as juntas coladas (Sikaforce® 7752).

Observam-se picos de tensões σ_y de tracção nas extremidades da sobreposição, embora na zona intermédia da camada de adesivo estas tensões sejam de compressão. Este efeito está relacionado com a curvatura ou deformação transversal da junta, que ocorre pela deformação dos aderentes decorrente da existência de um momento flector nas juntas de sobreposição simples, e que provoca separação nas extremidades da camada de adesivo e compressão na zona intermédia da mesma. Este estudo mostrou que os picos de tensões σ_y nas extremidades das juntas aumentam de magnitude com o aumento de L_0 e que ao mesmo tempo as tensões compressivas na zona interior da camada de adesivo diminuem. O aumento das tensões σ_y normalizadas com L_0 diminui a resistência das juntas, podendo levar à sua rotura prematura [65, 78].

Verificou-se que o adesivo Araldite® AV138, comparativamente com o Araldite® 2015 e o Sikaforce® 7752, apresenta picos mais elevados de tensões normalizadas σ_y nas extremidades da junta, devido ao valor de rigidez mais elevado, o que contribui para a rotura prematura da junta. O valor máximo de σ_y/τ_{avg} para o adesivo Araldite® AV138 é de 4,47, enquanto para os adesivos Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752 é de 3,39 e 1,56, respectivamente. De acordo com a análise apresentada conclui-se que o adesivo Sikaforce® 7752 é o que apresenta uma distribuição de tensões σ_y mais favorável à elevada resistência da junta, pois os picos de tensão σ_y são bastante mais baixos.

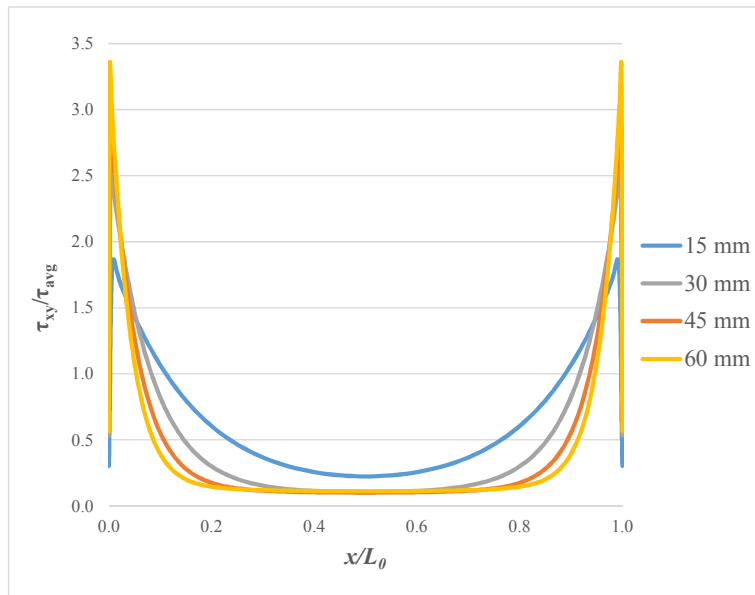


Figura 54 - Distribuição de tensões τ_{xy} a meio da espessura do adesivo em função de L_0 para as juntas coladas (Araldite® AV138).

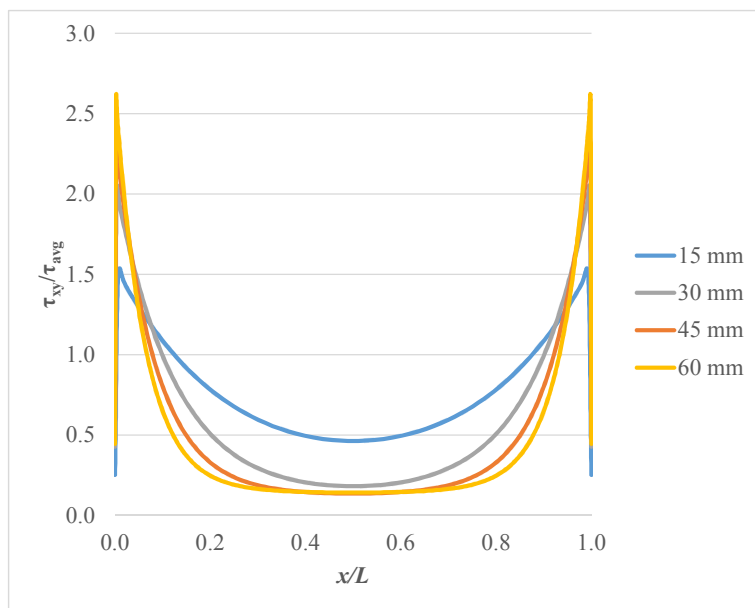


Figura 55 - Distribuição de tensões τ_{xy} a meio da espessura do adesivo em função de L_0 para as juntas coladas (Araldite® 2015).

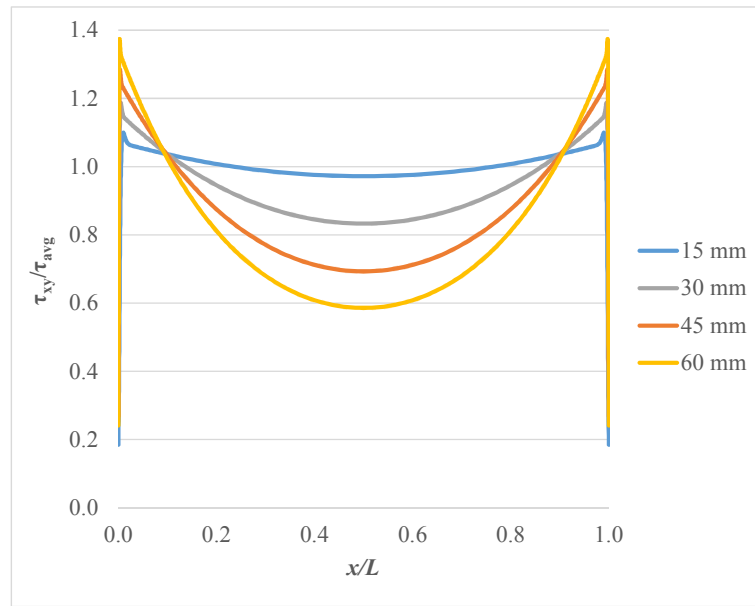


Figura 56 - Distribuição de tensões τ_{xy} a meio da espessura do adesivo em função de L_0 para as juntas coladas (Sikaforce® 7752).

Como mostra a Figura 54 à Figura 56, as distribuições de tensões τ_{xy} apresentam valores de tensão mais reduzidos na região interior do adesivo, atingindo o máximo nas extremidades da sobreposição [79, 80]. Este comportamento deve-se à deformação diferencial de cada um dos substratos ao longo da sobreposição, que é nula na extremidade livre de cada aderente e aumenta progressivamente até à extremidade oposta, o que provoca escorregamento localizado nas extremidades da sobreposição [9, 17]. Na região central da sobreposição estes efeitos são anulados, e o aparecimento de tensões τ_{xy} é apenas devido ao esforço de tracção aplicado na junta que provoca o deslizamento em corte dos aderentes. Os gradientes de tensão τ_{xy} aumentam com L_0 devido ao gradiente crescente de deformações longitudinais nos aderentes causados pelas grandes áreas de L_0 e aumento dos esforços transmitidos. Este comportamento prejudica a resistência das juntas, especialmente para adesivos frágeis.

Comparando os resultados dos três adesivos, o Araldite® AV138 possui valores de tensão de pico mais elevados comparativamente com os outros dois adesivos, mais uma vez devido à maior rigidez do mesmo [81]. O valor máximo de τ_{xy}/τ_{avg} que este apresenta é de 3,36, enquanto para o Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752 este valor é de 2,62 e 1,37, respectivamente. De forma idêntica ao exposto para as tensões σ_y , as tensões τ_{xy} são mais favoráveis em termos de resistência da junta para o adesivo Sikaforce® 7752, seguido do Araldite® 2015 e finalmente do Araldite® AV138.

4.3.2 Juntas híbridas

A distribuição de tensões σ_y e τ_{xy} em função de L_0 é dada pela Figura 57 à Figura 59 e Figura 60 à Figura 62, respectivamente. As juntas híbridas apresentam, para além dos picos de tensão nas extremidades da junta, picos de tensão nos limites do ponto de soldadura, devido ao facto deste ter uma rigidez muito superior à do adesivo circundante. Ao contrário das juntas coladas, em que os valores de pico das tensões τ_{xy} normalizadas eram superiores às tensões σ_y , no caso das juntas híbridas observou-se que, em geral, as tensões σ_y possuem uma magnitude máxima nas extremidades de sobreposição superior à das tensões τ_{xy} .

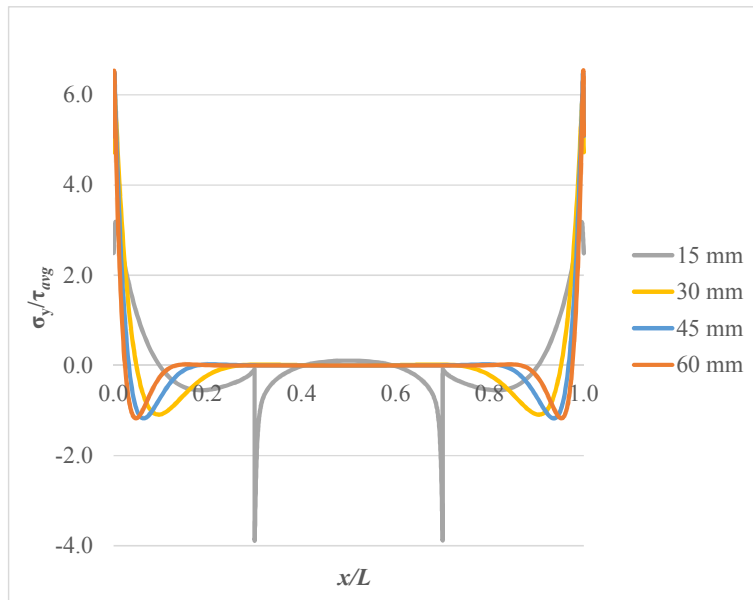


Figura 57 - Distribuição de tensões σ_y a meio da espessura do adesivo em função de L_0 para as juntas híbridas (Araldite® AV138).

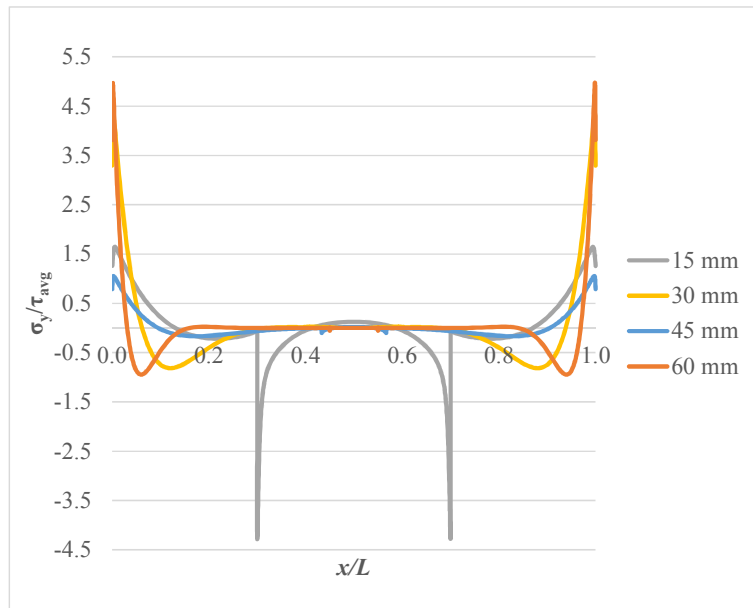


Figura 58 - Distribuição de tensões σ_y a meio da espessura do adesivo em função de L_0 para as juntas híbridas (Araldite® 2015).

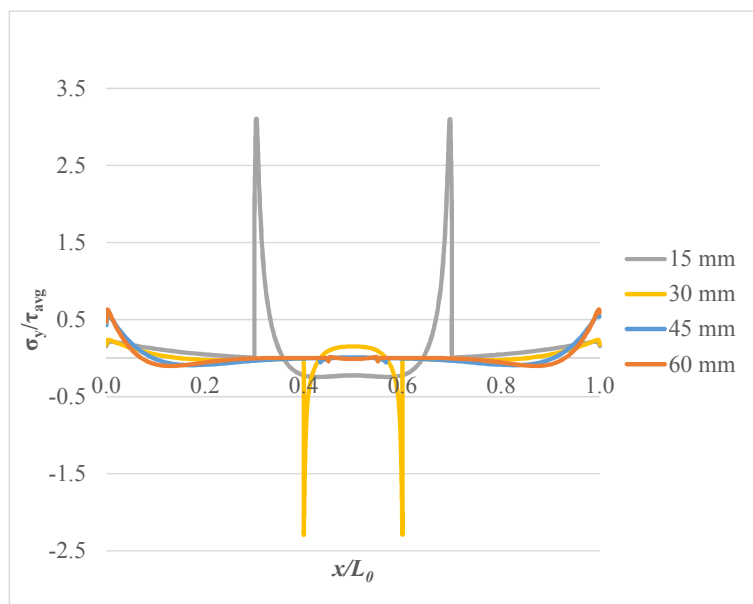


Figura 59 - Distribuição de tensões σ_y a meio da espessura do adesivo em função de L_0 para as juntas híbridas (Sikaforce® 7752).

As distribuições de tensões σ_y nas ligações híbridas, tal como as juntas coladas, apresentam picos com gradientes acentuados nas extremidades da sobreposição. Comparando a magnitude normalizada destes picos de tensão, dependendo do tipo de adesivo, esta é superior nas juntas híbridas com os adesivos Araldite® AV138 e 2015, e inferior para as juntas híbridas com o adesivo Sikaforce® 7752. Na zona abrangida pelo ponto de soldadura

observam-se picos de tensões σ_y derivados da substancial diferença de rigidez para o adesivo exterior. Esta diferença para as juntas coladas é localizada na zona intermédia da camada de adesivo e não se traduz numa diferença digna de registo na zona exterior ao ponto de soldadura. Assim, em termos de tensões σ_y , o efeito do ponto de soldadura é relativamente reduzido. Observa-se também que o efeito do ponto de soldadura nas tensões σ_y é máximo para o valor de L_0 mais reduzido e diminui gradualmente com o valor de L_0 , devido ao posicionamento do ponto de soldadura em zonas da tensão σ_y cada vez mais reduzida com o aumento de L_0 .

No caso do adesivo Araldite® AV138, a única diferença na distribuição de tensões σ_y observa-se para as juntas híbridas com $L_0 = 15$ mm, nas quais o ponto de soldadura suporta parte da carga com tensões compressivas, pelo que se assume que a influência na resistência da junta é reduzida. Para valores de L_0 superiores a 15 mm, as tensões σ_y são inteiramente suportadas pela camada de adesivo. Relativamente aos adesivos Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752, continua-se a observar a influência do ponto de soldadura para valores mais elevados de L_0 , embora para as juntas com o adesivo Araldite® 2015 e valores de L_0 superiores a 15 mm este efeito seja muito reduzido. Para as juntas coladas com o adesivo Sikaforce® 7752 e $L_0 = 15$ mm, como mostra a Figura 59, o ponto de soldadura passa a estar associado a tensões σ_y de arrancamento, o que se considera estar associado à menor rigidez do adesivo. Esta diferença para os restantes dois adesivos traduz-se numa diminuição dos esforços de arrancamento no adesivo relativamente à junta colada, com benefícios no que concerne à resistência da junta. Assim, a contribuição do adesivo para resistência à separação dos substratos é muito inferior aos restantes, especialmente ao adesivo Araldite® AV138, devido à capacidade deste adesivo em acompanhar as deformações a que a junta está sujeita [38]. Conclui-se assim que o ponto de soldadura, no que diz respeito às tensões σ_y , é mais benéfico para as juntas com o adesivo Sikaforce® 7752.

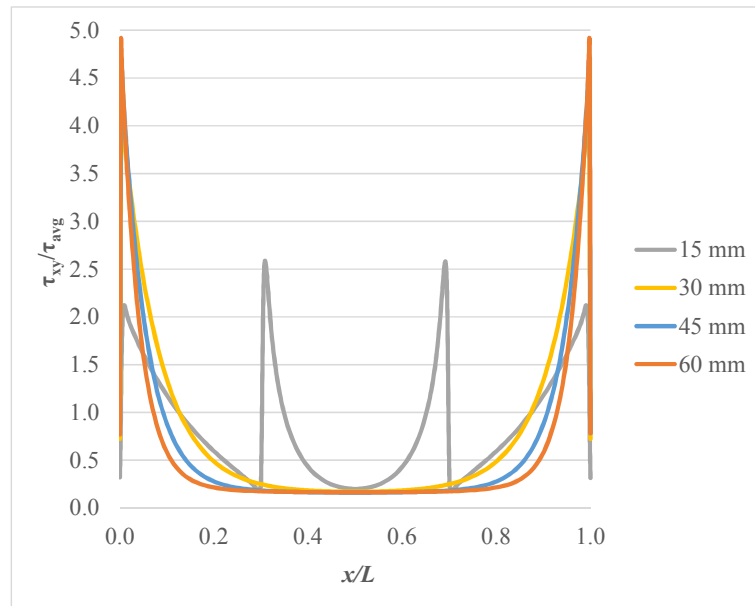


Figura 60 - Distribuição de tensões τ_{xy} a meio da espessura do adesivo em função de L_0 para as juntas híbridas (Araldite® AV138).

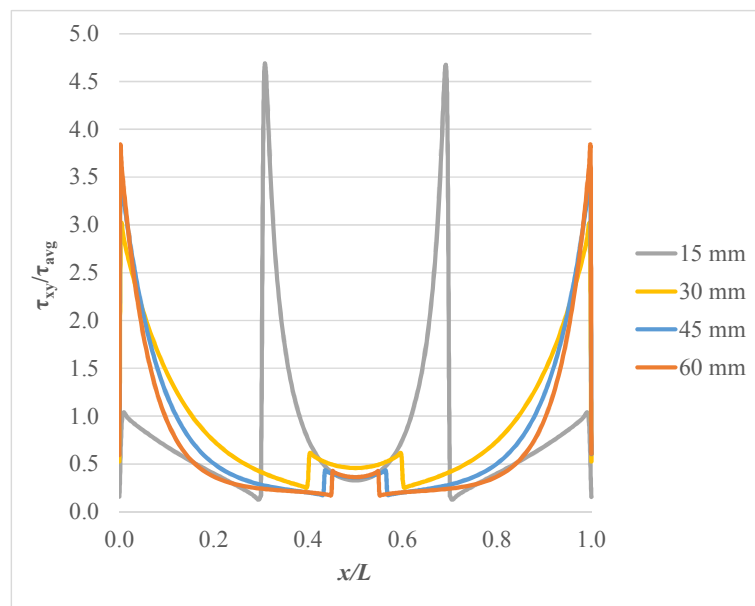


Figura 61 - Distribuição de tensões τ_{xy} a meio da espessura do adesivo em função de L_0 para as juntas híbridas (Araldite® 2015).

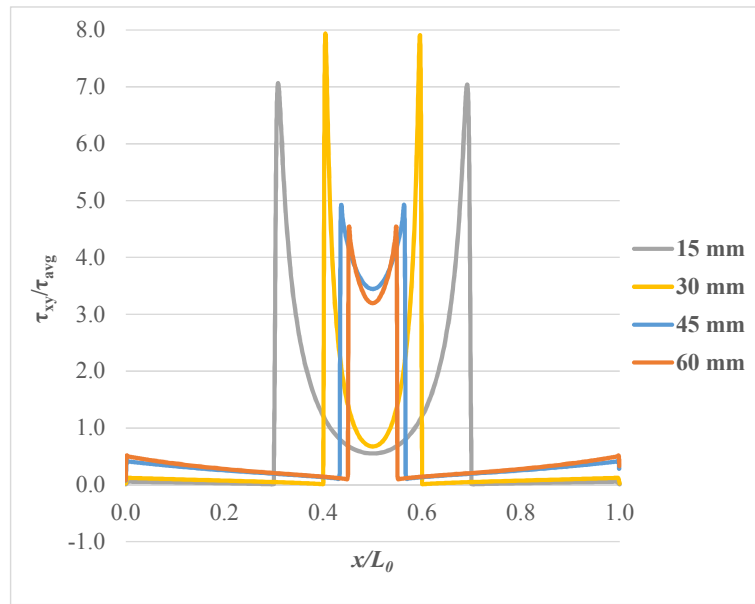


Figura 62 - Distribuição de tensões τ_{xy} a meio da espessura do adesivo em função de L_0 para as juntas híbridas (Sikaforce® 7752).

Nas figuras apresentadas observa-se que a combinação do adesivo com o ponto de soldadura se traduz num aumento localizado das tensões τ_{xy} na periferia do ponto de soldadura, que é responsável pela maior transferência de esforços pelo ponto de soldadura. Nota-se que, independentemente do adesivo considerado, o efeito do ponto de soldadura em termos de magnitude de tensões τ_{xy} diminui gradualmente com o valor de L_0 , o que provavelmente se traduzirá numa diminuição da influência do ponto de soldadura na resistência das juntas com o aumento de L_0 . A mudança de distribuição de tensões pela introdução do ponto e soldadura é benéfica para a resistência da junta pois permite a transmissão de esforços acrescidos.

Na Figura 60 observa-se que a distribuição de tensões τ_{xy} da junta híbrida com o adesivo Araldite® AV138 e com $L_0 = 15$ mm apresenta valores mais reduzidos nas extremidades da sobreposição, enquanto o ponto de soldadura suporta a maioria dos esforços de corte, que são os grandes responsáveis pela transmissão de esforços entre os substratos. Para os restantes L_0 a influência do ponto de soldadura não se faz notar nestas distribuições de tensões. Por outro lado, para o adesivo Araldite® 2015, o efeito do ponto de soldadura é observável para todos os valores de L_0 considerados, como mostra a Figura 61. No entanto, a partir de $L_0 = 30$ mm, a contribuição é muito reduzida. Esta diferença para as juntas com o adesivo Araldite® AV138 deve-se à menor rigidez do adesivo, e traduz-se num comportamento benéfico para a junta, uma vez que o ponto de soldadura vai contribuir de forma mais activa para a transmissão de esforços. Os picos de tensão nas extremidades da

sobreposição são minimizados para $L_0 = 15$ mm, embora o mesmo não ocorra para valores de L_0 mais elevados. O adesivo Sikaforce® 7752 foi sem dúvida o adesivo no qual a introdução do ponto de soldadura se fez sentir de forma mais visível nas distribuições de tensões τ_{xy} . A sua alta ductilidade permitiu que, ao solicitar as juntas, grande parte do esforço de corte seja suportado pelo ponto de soldadura. As tensões de corte nas extremidades são bastantes reduzidas neste caso, como se pode observar na Figura 62, pois este adesivo é bastante flexível, e tal tem influência na capacidade do adesivo acompanhar as grandes deformações transversais da junta. Espera-se assim que este adesivo apresente uma melhoria mais significativa da resistência, comparativamente às juntas com os outros 2 adesivos estudados.

4.4 Previsão de resistência

Neste capítulo são apresentados os resultados da modelação numérica por MDC para a previsão da resistência das juntas adesivas, soldadas e híbridas. No caso da validação desta técnica numérica para o efeito proposto, obtém-se uma ferramenta numérica para um dimensionamento destas ligações de forma mais rápida, eficiente e económica. Refere-se, no entanto, que os resultados quantitativos e as vantagens relativas entre as diversas técnicas de ligação devem ser considerados válidos apenas para as condições geométricas e materiais específicos deste trabalho.

4.4.1 Juntas com Araldite® AV138

Na Figura 63 apresenta-se os valores de $P_{m\acute{a}x}$ para as diferentes configurações de juntas com o adesivo Araldite® AV138 (ligação adesiva e híbrida com os diferentes valores de L_0 estudados, e comparação com a resistência da junta soldada para referência).

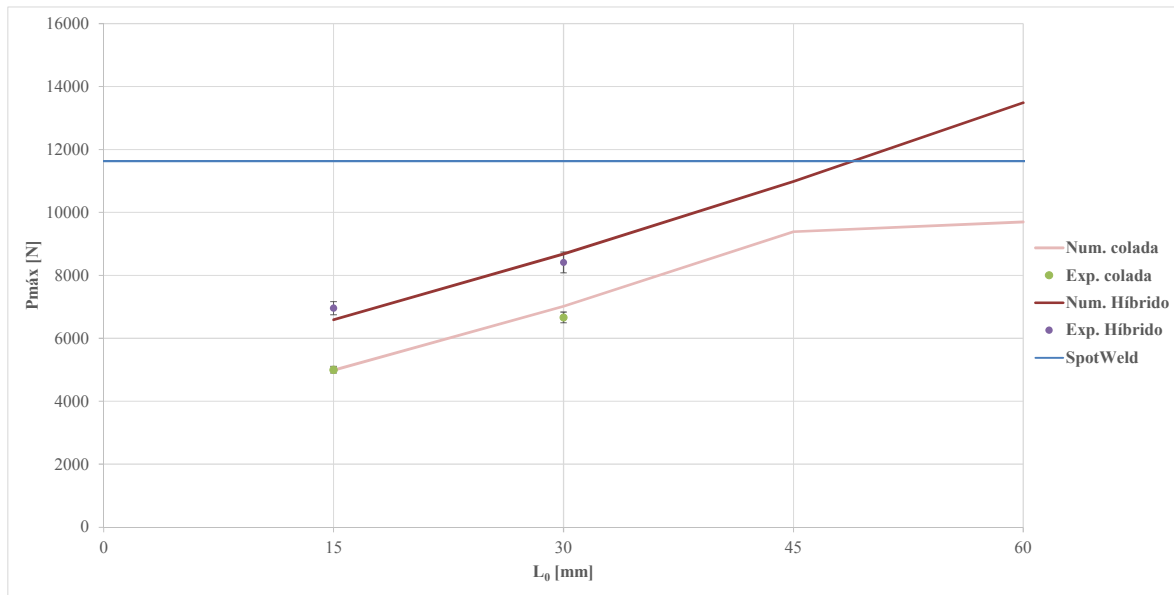


Figura 63 - Comparação dos resultados experimentais de $P_{máx}$ com os resultados obtidos pelo MEF para as juntas coladas e juntas híbridas com o adesivo Araldite® AV138 para diferentes L_0 .

A Figura 63 mostra a evolução de $P_{máx}$ com L_0 para as juntas coladas e híbridas resultante dos ensaios experimentais e dos resultados numéricos com indicação do desvio padrão para as condições experimentais. Os resultados numéricos das juntas coladas e híbridas mostram um aumento de $P_{máx}$ a uma taxa constante mas relativamente reduzida até $L_0 = 45$ mm, seguindo de uma redução de $P_{máx}$ até $L_0 = 60$ mm para as juntas coladas, enquanto o comportamento para as juntas híbridas é linear até $L_0 = 60$ mm. Em ambos os casos a taxa de aumento $P_{máx}$ com L_0 é reduzida. O comportamento observado resulta da combinação de dois factores: resistência dos aderentes e fragilidade do adesivo. Por um lado, a inexistência de um valor de patamar nas curvas $P_{máx}$ - L_0 significa que a resistência à tracção dos substratos não é atingida. Por outro lado, a fragilidade do adesivo leva à rotura das juntas praticamente sem plastificação do mesmo, o que faz com que $P_{máx}$ seja fortemente dependente dos picos de tensão. Uma vez que tanto o pico de tensões de arrancamento como o de tensões de corte aumentam em magnitude com L_0 (Figura 57 e Figura 60), o aumento deste parâmetro é extremamente prejudicial para a resistência da junta. Isto resulta numa melhoria reduzida de $P_{máx}$ com L_0 . Os resultados experimentais, disponíveis apenas até $L_0 = 30$ mm, apresentam uma evolução semelhante à observada numericamente. As juntas híbridas mostram uma melhoria considerável na resistência relativamente às juntas coladas em todos os L_0 , pois permitem uma transferência de esforços maior por corte na zona do ponto de soldadura, devido à rigidez mais elevada comparativamente com o adesivo. Isto

leva a que as tensões de corte τ_{xy} e de arrancamento σ_y no adesivo passem de grandes picos nas extremidades (Figura 51 e Figura 54) para tensões distribuídas de forma mais uniforme pela camada adesiva (Figura 57 e Figura 60). A diferença máxima de $P_{m\acute{a}x}$ entre os resultados experimentais com os obtidos pelo MEF para o adesivo Araldite® AV138 é reduzida. De facto, esta varia para juntas coladas desde aproximadamente 0,3% para a junta com $L_0 = 15$ mm até $\approx 5,3\%$ para $L_0 = 30$ mm. Relativamente às juntas híbridas a diferença é de -5,6% para $L_0 = 15$ mm e 3,1% para $L_0 = 30$ mm. Observa-se assim que, para as juntas adesivas e híbridas com este adesivo frágil, a precisão do método numérico utilizado é bastante elevada, tal como é comum para juntas adesivas com adesivos com características semelhantes [38].

4.4.2 Juntas com Araldite® 2015

Na Figura 64 é feita uma comparação dos resultados obtidos pelo MEF com os experimentais para as juntas coladas e híbridas com o adesivo Araldite® 2015, para a gama de valores de L_0 em análise e com a referência da junta soldada para efeitos de comparação.

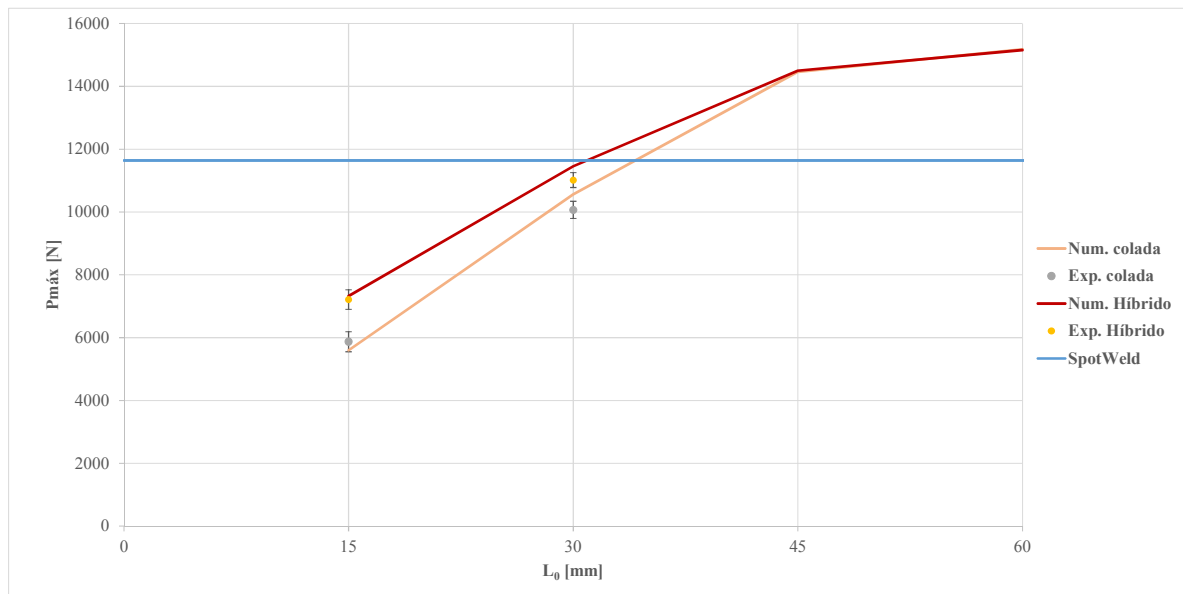


Figura 64 - Comparação dos resultados experimentais de $P_{m\acute{a}x}$ com os resultados obtidos pelo MEF para as juntas coladas e juntas híbridas com o adesivo Araldite® 2015 para diferentes L_0 .

Comparativamente ao adesivo Araldite® AV138, este adesivo apresenta um acréscimo superior de $P_{m\acute{a}x}$ com o aumento de L_0 entre 15 e 60 mm (valores numéricos). Isto deve-se

ao facto de o adesivo Araldite® AV138 ter uma menor ductilidade fazendo com que, mal se atinga as tensões limite do adesivo nas extremidades da sobreposição, se dê a rotura catastrófica da junta devido à ausência de capacidade de plastificação do adesivo [47]. O adesivo Araldite® 2015 tem menor resistência mas é mais dúctil, o que faz com que haja plastificação nas extremidades da sobreposição antes da rotura e, consequente, a resistência seja superior à de um adesivo mais resistente mas frágil, como é o caso do Araldite® AV138. [75]. As juntas híbridas mostram uma melhoria digna de registo na resistência relativamente às juntas coladas para $L_0 = 15$ mm, com uma diminuição progressiva com o incremento de L_0 , o que se atribui a uma transferência de esforços maior por corte na zona do ponto de soldadura devido à rigidez mais elevada comparativamente com o adesivo. Isto leva a que as tensões de corte τ_{xy} e de arrancamento σ_y no adesivo passem de grandes picos nas extremidades (Figura 52 e Figura 55) para tensões distribuídas de forma mais favorável pela camada adesiva (Figura 58 e Figura 61). O aumento observado entre as juntas adesivas e híbridas é inferior ao observado para as juntas com o adesivo Araldite® AV138, já que o efeito da plastificação dos aderentes que prejudicou a resistência destas juntas foi também observado nos modelos numéricos. Observa-se mais uma vez uma concordância muito aceitável entre os valores experimentais e as previsões numéricas de $P_{máx}$. A diferença entre os resultados numéricos e os experimentais varia para juntas coladas desde -4,7% para a junta com $L_0 = 15$ mm e de 4,9% para $L_0 = 30$ mm. Relativamente às juntas híbridas a diferença é de 1,6% para $L_0 = 15$ mm e de 4,1% para $L_0 = 30$ mm. Mais uma vez a técnica de MDC revelou-se eficaz na modelação das juntas coladas e híbridas, considerando um adesivo moderadamente dúctil.

4.4.3 Juntas com Sikaforce® 7752

A Figura 65 apresenta os resultados experimentais e numéricos das juntas coladas e híbridas referentes às juntas com o adesivo Sikaforce® 7752, mais uma vez sobrepondo a resistência da junta soldada para referência.

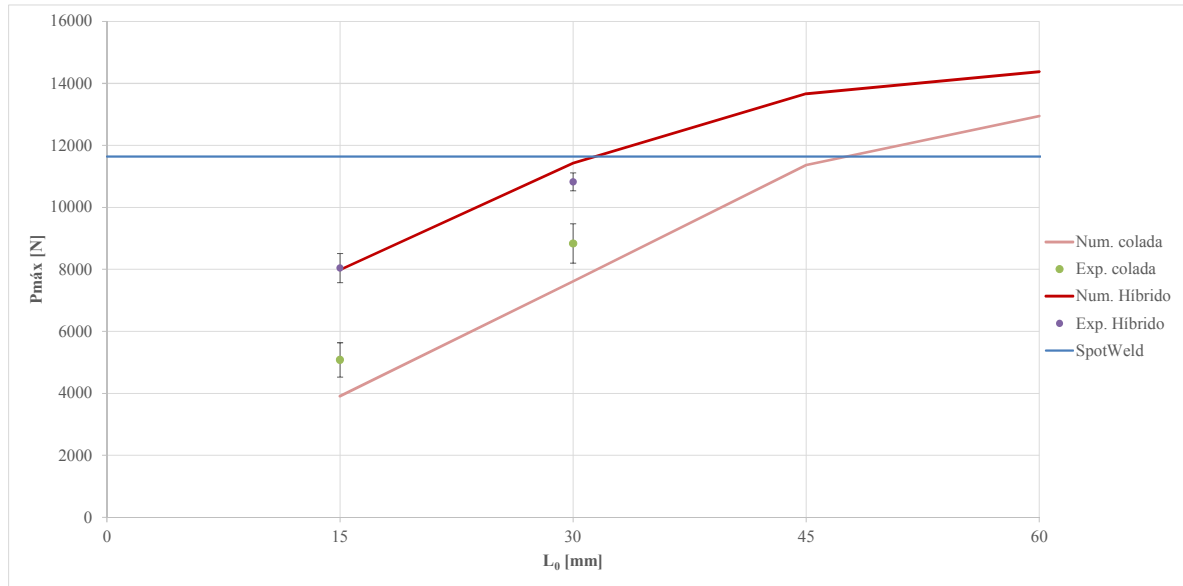


Figura 65 - Comparação dos resultados experimentais de $P_{máx}$ com os resultados obtidos pelo MEF para as juntas coladas e juntas híbridas com o adesivo Sikaforce® 7752 para diferentes L_0 .

A Figura 65 mostra que os resultados numéricos das juntas coladas e híbridas exibem um aumento de $P_{máx}$ a uma taxa aproximadamente constante até $L_0 = 45$ mm, com redução assinalável entre este valor e $L_0 = 60$ mm. A melhoria de $P_{máx}$ com L_0 é superior à observada para os adesivos anteriormente descritos, o que se deve ao menor gradiente de tensões (Figura 59 e Figura 62) e à elevada plasticidade do adesivo, o que faz com que este sofra rotura em condições próximas da cedência generalizada. As juntas híbridas mostram uma melhoria considerável na resistência relativamente às juntas coladas em $L_0 = 15$ mm e 30 mm, mas que diminui com o aumento de para L_0 , uma vez que o efeito relativo do ponto de soldadura na distribuição de tensões σ_y e τ_{xy} diminui gradualmente com L_0 . Este efeito pode ser observado nas Figura 53, Figura 56 e Figura 59, Figura 62. Comparando as previsões numéricas com os resultados experimentais, nota-se claramente uma tendência generalizada para a previsão por defeito dos valores observados experimentalmente para as juntas coladas com $L_0 = 15$ mm e 30 mm. De facto, o adesivo Sikaforce® 7752 apresenta uma ductilidade muito elevada e, como tal, a avaliação da resistência da junta numericamente traz alguma imprecisão nos resultados. Este fenómeno deve-se ao facto de se ter utilizado o modelo de dano triangular para um adesivo muito dúctil, uma vez que este modelo está mais direccionado para a modelação de materiais com comportamento frágil ou pouco dúctil, o que justifica os bons resultados obtidos com os adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015. Conforme já testado anteriormente [39], o modelo de dano mais apropriado

para este tipo de adesivos seria o trapezoidal. A diferença entre os resultados numéricos e os resultados experimentais é, para juntas coladas, de 30,1% para $L_0 = 15$ mm e de 16,0% para $L_0 = 30$ mm. Relativamente às juntas híbridas a diferença é de -0,7% para $L_0 = 15$ mm e para 5,6% para $L_0 = 30$ mm. A diferença é assim bastante superior para as juntas coladas do que para as juntas híbridas, uma vez que nestas últimas o ponto de soldadura também tem um papel importante no processo de rotura, e tal diminui a influência da lei coesiva escolhida para modelação para o adesivo.

4.4.4 Discussão de resultados

Observou-se anteriormente que a distribuição de tensões nas juntas coladas é afectada pela rigidez do adesivo. De facto, para um adesivo de baixa rigidez como o Sikaforce® 7752 a distribuição de tensões é mais uniforme em comparação com um adesivo mais rígido como o Araldite® AV138 (Figura 54 e Figura 56) [82]. Por outro lado, adesivos frágeis como o Araldite® AV138 não permitem a plastificação da camada de adesivo a partir do ponto em que a tensão de rotura dos mesmos é atingida nas extremidades de sobreposição. De facto, esta característica faz com que, quando as tensões limites do adesivo são atingidas nas extremidades da sobreposição, se dê a rotura catastrófica da junta devido à ausência de capacidade de plastificação do adesivo [76]. Em face do exposto, comparativamente aos outros dois adesivos, Sikaforce® 7752 e Araldite® 2015, o aumento de $P_{máx}$ com L_0 para o adesivo Araldite® AV138 não é tão acentuado. Para as juntas coladas com $L_0 = 15$ mm, o adesivo Araldite® AV138 apresenta um valor de $P_{máx}$ não muito distante do observado para o Araldite® 2015 (Figura 45 e Figura 46) pois, para valores de L_0 reduzidos, as distribuições de tensões são mais constantes ao longo da camada do adesivo, o que faz com que um adesivo com maior resistência, embora frágil, apresente resistência comparável a um adesivo dúctil. Contudo, apesar de ter algumas propriedades mecânicas inferiores ao adesivo Araldite® AV138, o adesivo Araldite® 2015 possui propriedades de tenacidade que o definem como sendo um adesivo moderadamente dúctil, o que o torna capaz de suportar cargas substancialmente mais elevadas para L_0 superiores a 15 mm.

Um adesivo dúctil possui a vantagem de conseguir distribuir a carga de forma mais uniforme através do uso das regiões em que as tensões são tipicamente mais baixas. Nestas condições, um adesivo com menor resistência e mais dúctil atinge mais rapidamente a cedência nas

extremidades da camada de adesivo. Por outro lado, também permite a plastificação destas zonas, o que faz com que a tensão de corte média seja superior à de um adesivo frágil, cuja junta fractura mal a resistência do adesivo é atingida nas extremidades da camada adesiva [83]. Por ser um adesivo que combina propriedades de resistência moderada e alta ductilidade, este adesivo é mais favorável para valores de L_0 tanto reduzidos (devido à resistência mecânica) como elevados (devido à ductilidade). Para este adesivo, quanto maior o valor de L_0 , mais acentuada é a diferença para o adesivo Araldite® AV138.

Desta forma e com base nos resultados obtidos, para juntas coladas a combinação de alta resistência e ductilidade é o ideal. Contudo, para os adesivos estudados observou-se que os melhores resultados ocorreram para os adesivos Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752, pois estes combinam uma menor rigidez aliada a uma maior ductilidade, comparativamente ao Araldite® AV138. Para valores de L_0 reduzidos, os três adesivos apresentam valores de resistência comparáveis, pois nestas condições adesivos frágeis mas resistentes também apresentam bons resultados. Para valores de L_0 pequenos (neste caso 15 mm) o adesivo Araldite® 2015 é a opção mais viável quando comparada com os restantes. Caso sejam pretendidos L_0 mais elevados, a melhor opção é a utilização do Araldite® 2015 ou do Sikaforce® 7752 pela capacidade superior de plastificação que estes apresentam. A escolha do melhor adesivo para uma junta deve ter em consideração todos estes factores.

O aumento da resistência nas juntas híbridas foi superior para o adesivo Sikaforce® 7752, seguindo-se o Araldite® AV138 e Araldite® 2015, que apresenta o pior aumento de resistência. Este comportamento está relacionado com a ductilidade dos adesivos, mas também com a ocorrência ou não da plastificação dos substratos, que induz a rotura prematura da camada de adesivo. De facto, as juntas com ponto de soldadura sofrem grande rotação transversal na zona da sobreposição, em que nas juntas híbridas o adesivo deve acompanhar este efeito. Como o adesivo Araldite® AV138 é muito frágil, o aumento de resistência é inferior ao do Sikaforce® 7752, pois o adesivo não acompanha as grandes deformações transversais. Com o aumento da ductilidade, acontece o oposto, e o adesivo Sikaforce® 7752 apresenta um aumento bastante superior comparativamente ao Araldite® AV138. Seria de esperar um aumento superior de resistência nas juntas híbridas com o adesivo Araldite® 2015 comparativamente ao AV138. No entanto, tal não ocorreu devido aos maiores valores de $P_{máx}$ associados ao Araldite® 2015, que se traduziram numa rotura induzida por plastificação local dos substratos.

As juntas híbridas mostram uma melhoria considerável na resistência relativamente às juntas coladas para $L_0 = 15$ mm e $L_0 = 30$ mm, o que se atribui a uma transferência de esforços maior por corte na zona do ponto de soldadura devido à rigidez mais elevada comparativamente com o adesivo. Observou-se também que as distribuições de tensões de corte τ_{xy} e de arrancamento σ_y no adesivo passam de grandes picos nas extremidades (juntas coladas) para tensões distribuídas de forma mais constante pela camada adesiva (juntas híbridas). Por outro lado, para valores mais elevados de L_0 , os valores de $P_{m\acute{a}x}$ tendem a aproximar-se das juntas adesivas por causa da diminuição da influência do ponto de soldadura na distribuição de tensões τ_{xy} e σ_y ao longo da sobreposição (Figura 64 e Figura 65). Também a contribuir para esta aproximação está a plastificação dos substratos para os valores mais elevados de L_0 . Numericamente, a vantagem das juntas híbridas relativamente às juntas coladas com o Araldite® AV138 para $L_0 = 15$ mm é de 24,9%, enquanto para $L_0 = 30$ mm as juntas híbridas conseguem uma melhoria 19,1%, para $L_0 = 45$ mm de 14,5% e para $L_0 = 60$ mm a melhoria foi de 28,1%. Relativamente ao adesivo Araldite® 2015, a vantagem das juntas híbridas sobre as juntas adesivas não é tão significativa (30,9% para $L_0 = 15$ mm, 8,5% para $L_0 = 30$ mm, 0,2% para $L_0 = 45$ mm e -0,2% para $L_0 = 60$ mm). Já para o adesivo Sikaforce® 7752 conseguiu-se um aumento bastante significativo, que para $L_0 = 15$ mm foi de 104,4%, para $L_0 = 30$ mm foi de 50,1%, para $L_0 = 45$ mm foi de 20,3%, enquanto para $L_0 = 60$ mm o aumento não foi além dos 11,1%. Esta melhoria, relativamente aos outros 2 adesivos, deve-se à maior ductilidade, conforme já referido anteriormente, que permite acompanhar as grandes deformações transversais e rotações da junta impostas devido à transmissão de esforços pelo ponto de soldadura.

5 Conclusões

Neste trabalho foi apresentado um estudo experimental e numérico pelo MEF de juntas de sobreposição simples híbridas, em comparação com as juntas puramente adesivas, com os objectivos de comparação, e também de averiguar a capacidade do MEF e dos MDC em simular este tipo de juntas. Para o efeito, consideraram-se JSS com substratos de aço C45E, com valores de L_0 diferentes. Os três adesivos considerados variam desde um comportamento rígido e frágil (Araldite® AV138) até um adesivo de alta ductilidade (Sikaforce® 7752). O Araldite® 2015 apresentou um comportamento intermédio relativamente aos 2 anteriores no que concerne à ductilidade. Também relevante é a obtenção de resultados que permitam a análise comparativa dos diferentes tipos de adesivos em junta adesiva e junta híbrida, e a selecção do tipo de adesivo mais adequado a utilizar para as diferentes configurações de juntas.

Posteriormente à realização dos ensaios experimentais e depois de tratar os dados, verificou-se que a variação de $P_{m\acute{a}x}$ com L_0 nas juntas adesivas era mais notória para os adesivos mais dúcteis devido à sua plasticidade e capacidade de suportar maiores deformações. Como tal, a variação da resistência depende inteiramente do adesivo aplicado. Contudo, também se observou uma melhoria de $P_{m\acute{a}x}$ com L_0 nas juntas híbridas, embora a melhoria reduza significativamente com o aumento de L_0 , maioritariamente devido à diminuição da influência do ponto de soldadura na distribuição de tensões τ_{xy} ao longo da sobreposição. O adesivo Araldite® 2015 apresentou um aumento de $P_{m\acute{a}x}$ nas juntas híbridas inferior aos restantes dois adesivos. Embora tal comportamento não fosse antecipado pelas características dos adesivos e causa e respectivas distribuições de tensões, este ocorreu pois o adesivo Araldite® 2015 tem associados valores superiores de $P_{m\acute{a}x}$. Este facto fez com que, contrariamente ao adesivo AV138, os substratos tenham plastificado antes da rotura do adesivo, o que provocou a sua rotura prematura. As juntas com o adesivo Sikaforce® 7752 aparentemente não foram afectadas por esta ocorrência devido à grande capacidade de plastificação do adesivo em causa. A comparação de resistência entre as duas técnicas de

ligação mostrou a grande vantagem na utilização de juntas híbridas, comparativamente às juntas coladas. Com o aumento de L_0 , observou-se um aumento de $P_{m\acute{a}x}$ mais significativa para as juntas híbridas com o adesivo Sikaforce® 7752, porque o adesivo apresenta ductilidade suficiente para acompanhar as elevadas deformações transversais da junta. Assim, quando é necessário um L_0 reduzido em juntas coladas os 3 adesivos têm um comportamento semelhante. Contudo, quando é necessário valores de L_0 elevado em juntas híbridas a escolha recai sobre o adesivo Sikaforce® 7752 e para juntas coladas com L_0 elevados a escolha mais clara é o Araldite® 2015.

No âmbito do trabalho numérico realizado, as distribuições de tensões σ_y e τ_{xy} na camada de adesivo por EF permitiram uma justificação detalhada do comportamento das juntas, cuja análise de distribuição de tensão na zona de sobreposição permitiu compreender os fenómenos na origem do comportamento observado. Já nas juntas híbridas, para além dos picos de tensão nas extremidades da junta, também se observaram picos de tensão nos limites do ponto de soldadura, provenientes de uma rigidez muito superior à do adesivo circundante. A modelação por MDC com uma lei de dano triangular mostrou ser bastante precisa para juntas onde se empregue adesivos frágeis, como o Araldite® AV138, e moderadamente dúcteis, como o Araldite® 2015. Para o adesivo Sikaforce® 7752, a lei de dano triangular não revelou ser a mais adequada devido à grande ductilidade do adesivo, o que resultou numa discrepância de valores de resistência bastante alta quando comparando valores numéricos e experimentais. O erro máximo existente nas juntas coladas foi de 5,6% para o Araldite® AV138, de 4,9% para o Araldite® 2015 e 30,1% para o Sikaforce® 7752.

Como resultado deste trabalho, pode-se concluir que foi possível avaliar em pormenor as potencialidades desta ferramenta numérica na avaliação da resistência das juntas e proporcionar assim uma indicação sobre o comportamento de diferentes adesivos em JSS. Apesar de os resultados apresentados não poderem ser directamente extrapolados para materiais e geometrias diferentes sem uma análise prévia, a validação da técnica proposta de MEF/MDC para a simulação das juntas adesivas e híbridas para os adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015 foi conseguida, permitindo assim o projecto mais fácil destas ligações. Para o adesivo Sikaforce® 7752, a análise deverá ser feita por uma lei coesiva diferente da lei triangular para permitir uma aproximação mais fiel ao comportamento observado.

Como sugestões para trabalhos futuros, refere-se o uso de diferentes leis coesivas relativamente à usada neste trabalho para os adesivos com ductilidade elevada. Em vez de uma lei triangular para o adesivo Sikaforce[®] 7752, poderia ser usada uma lei trapezoidal para minimizar o erro entre os valores experimentais e numéricos. Para além disso, poderia ser feito um estudo da influência de chanfros nos substratos, nas extremidades da junta, com o propósito de diminuir os esforços na camada do adesivo decorrentes das elevadas deformações transversais nas juntas na zona de ligação da camada de adesivo não ficar sujeita a esforços tão elevados devido às deformações transversais na zona de ligação.

Referências Documentais

1. Petrie E.M., Handbook of Adhesives and Sealants. McGraw Hill, New York. 2000.
2. ASTM D1002-10, Standard Test Method for Apparent Shear Strength of Single-Lap-Joint Adhesively Bonded Metal Specimens by Tension Loading (Metal-to-Metal), ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org. 2010.
3. ASTM D5656-10, Standard Test Method for Thick-Adherend Metal Lap-Shear Joints for Determination of the Stress-Strain Behavior of Adhesives in Shear by Tension Loading, ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org. 2010.
4. Pereira A.M.B., Fractura de juntas coladas. Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica. Universidade de Aveiro. Aveiro. 2002.
5. de Jesus I.S.P., Resistência de ligações coladas Metal-Metal. Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica. Universidade de Aveiro. Aveiro. 2009.
6. Silva L.F.M., Adams R.D., Measurement of the mechanical properties of structural adhesives in tension and shear over a wide range of temperatures. *J Adhesion Sci Technol*, 19:109–41. 2005.
7. Pinto A.M.G., Ligações adesivas entre materiais poliméricos com e sem alteração superficial dos substratos. Tese de Doutoramento em Engenharia Mecânica. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto. 2007.
8. Carbas R.J.C., Estudo paramétrico de juntas adesivas pelo método de Taguchi. 2008. Acedido em: 22, Abril, 2014, em: <http://paginas.fe.up.pt/~em03159/>.
9. da Silva L.F.M., Magalhães A.G., Moura M.F.S.F., Juntas Adesivas Estruturais. Publindústria. 2007.
10. Pereira A.B., de Moraes A.B., “Influência das tensões de bordo na resistência de juntas coladas de sobreposição”, *Revista Iberoamericana de Ingenieria Mecânica*.

- Vol.8, N.º3, pp. 69-79, 2004. Acedido em: 25, Abril, 2014, em: http://www.uned.es/ribim/volumenes/Vol8N3Nov_2004/V8N3A07%20Bastos.pdf.
11. Gleich D.M., Van Tooren M.J.L., Beukers A., Analysis and evaluation of bondline thickness effects on failure load in adhesively bonded structures. J. Adhesion Sci. Technol., Vol. 15. 9:1091–1101, 2001.
12. Monteiro D.F., Análise do comportamento à fractura de juntas de aço efectuadas com adesivos estruturais. Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, 1995.
13. Shields J.B.S., Adhesives Handbook 3rd ed. Butterworth & Company, London. (<http://www.respostatecnica.org.br/dossie-tecnico/downloadsDT/MTEz>). 1984.
14. Fay P.A., History of adhesive bonding. In: Adams RD (editor). Adhesive bonding - Science, technology and applications. Woodhead Publishing Limited, Cambridge England. 2005.
15. da Silva L.F.M., Critchlow G.W.; Figueiredo M.A.V., “ Parametric Study of Adhesively Bonded Single Lap Joints by the Taguchi Method”, J. Adhesion Sci. Technol., 22:1477. 2008.
16. da Silva L.F.M.; Ramos J.E.; Figueiredo M.V.; Strohaecher T.R., “Influence of the Adhesive, the Adherend and the Overlap on the Single Lap Shear Strength”, Journal of Adhesion and Interface, Vol.7, No.4. 2006.
17. Volkersen O., Die nietkraftverteilung in zubeanspruchten nietverbindungen mit konstanten loschonguerschnitten. Luftfahrtforschung, 15:41–47. 1938.
18. Goland M., Reissner E., “The Stresses in Cemented Joints”, Journal of Applied Mechanics, Vol.11, March, pp. A17-A27. 1944.
19. Hart-Smith L.J., “Adhesive-Bonded Single-Lap Joints”, NASA CR-112236, January. 1973.
20. Banea M.D., da Silva L.F.M., The Journal of Adhesion, 85:261–285. 2009.

21. Adams R.D., Mallick V., A method for the stress analysis of lap joints. *J. Adhesion*, 38:199–217. 1992.
22. Adams R.D., *Adhesive bonding - Science, technology and applications*. WoodHead Publishing Limited. Cambridge England. 2005.
23. da Costa M.B.S.F.P., Development of a web application for the design of adhesive joints. Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto. 2013.
24. da Silva L.F.M., Campilho R.D.S.G., *Advances in Numerical Modelling of Adhesive Joints*. Springer. 2012.
25. da Silva L.F.M., das Neves P.J.C., Adams R.D., Spelt J.K., Analytical models of adhesively bonded joints—Part I: literature survey. *Int. J. Adhes. Adhes.*, 29:319–330. 2009.
26. Zhao X., Adams R.D., da Silva L.F.M., Single lap joints with rounded adherend corners: Stress and strain analysis. *J. Adhes. Sci. Technol.*, 25:819–836. 2011.
27. Clarke J.D., McGregor I.J., Ultimate tensile stress over a zone: a new failure criterion for adhesive joints. *J. Adhes.*, 42:227–245. 1993.
28. Anderson T.L., *Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications*. Boca Raton: CRC Press. 1995.
29. Petry G., Comparação do efeito de retardo de trinca por sobrecarga entre corpos de prova ct e trincas em dutos reais. Tese de Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2011.
30. Fernlund G., Spelt J.K., Failure load prediction. *Int. J. Adhes Adhes*, 11:213–227. 1991.
31. Barenblatt G.I., The formation of equilibrium cracks during brittle fracture. General ideas and hypothesis. Axisymmetrical cracks. *J Appl Math Mech*, 23:622–636. 1959.
32. Barenblatt G.I., The mathematical theory of equilibrium cracks in brittle fracture. *Adv Appl Mech*, 7:55–129. 1962.

33. Dugdale D.S., Yielding of steel sheets containing slits. *J Mech Phys Solids*, 8:100–104. 1960.
34. Ji G., Ouyang Z., Li G., Ibekwe S., Pang S.S., Effects of adhesive thickness on global and local Mode-I interfacial fracture of bonded joints. *Int. J. Solids Struct.*, 47: 2445–2458. 2010.
35. Turon A., Costa J., Camanho P.P., Dávila C.G., Simulation of delamination in composites under high-cycle fatigue. *Compos. Part A*, 38:2270–2282. 2007.
36. Kafkalidis M.S., Thouless M.D., The effects of geometry and material properties on the fracture of single lap-shear joints. *Int. J. Solids Struct.*, 39: 4367–4383. 2002.
37. Yang Q.D., Thouless M.D., Mixed-mode fracture analyses of plastically deforming adhesive joints. *Int. J. Fract.*, 110:175–187. 2001.
38. Campilho R.D.S.G., Pinto A.M.G., Banea M.D., da Silva L.F.M., Optimization study of hybrid spot-welded/bonded single-lap joints. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 37:86–95. 2012.
39. Ridha M., Tan V.B.C., Tay T.E., Traction-separation laws for progressive failure of a bonded scarf repair of composite panel. *Compos. Struct.*, 93:1239–45. 2010.
40. Khoramishad H., Crocombe A.D., Katnam K.B., Ashcroft I.A., Predicting fatigue damage in adhesively bonded joints using a cohesive zone model. *Int. J. Fatigue*, 32:1146–1158. 2010.
41. Daudeville L., Ladeveze P., A damage mechanics tool for laminate delamination. *Compos. Struct.*, 25:547–555. 1993.
42. Hua Y., Crocombe A.D., Wahab M.A., Ashcroft I.A., Continuum damage modeling of environmental degradation in joints bonded with EA9321 epoxy adhesive. *Int. J. Adhes.*, 28:302-313. 2008.
43. Chen Z., Adams R.D., da Silva L.F.M., Prediction of crack initiation and propagation of adhesive lap joints using an energy failure criterion. *Eng Fract Mech*, doi:10.1016/j.engfracmech.2010.12.004. 2011.

44. Mohammadi S., Extended finite element method for fracture analysis of structures. Blackwell Publishing, New Jersey, 46:131 – 150. 2008.
45. Belytschko T., Black T., Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing. *Int. J. Fract. Mech.*, 45:601 – 620. 1999.
46. Moës N., Dolbow J., Belytschko T., A finite element method for crack growth without remeshing. *Int. J. Numer. Meth. Eng.*, 46:131 – 150. 1999.
47. Campilho R.D.S.G., Banea M.D., Pinto A.M.G., Silva L.F.M, Jesus A.M.P., Strenght prediction of single- and double-lap joints by standard and extended finite element modelling. *Int. J. Adhes. Adhes.*, 31:363-372. 2011.
48. Graham D.P., Rezai A., Baker D., Smith P.A., Watts J.F., BAE Systems, Materials Sciences, Sowerby Building - 20R, Filton, Bristol, BS34 7QW, UK. Faculty of Engineering and Physical Sciences, University of Surrey, Guildford, GU2 7XH, UK;
49. Schwartz M.M., Metals joining manual book. New York: McGraw-Hill, p. 1–32. 1979.
50. Shen J., Zhang Y. S., Lai X. M., Wang P. C., Adhesive Placement in Weld-Bonding Multiple Stacks of Steel Sheets. *Welding Journal*. 2012.
51. Al-Samhan A., Darwish S.M.H., Strength prediction of weld-bonded joints. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 23. 2002.
52. Santos I.O., Zhang W., Gonçalves V.M., Bay N., Martins P.A.F., Weld bonding of stainless steel. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 44. 2004.
53. Campilho R.D.S.G., Adhesive, welded and weld-bonded single-lap joints: numerical technique for strength prediction. *Ciência & Tecnologia dos Materiais*, Vol. 24, n.º 1/2. 2012.
54. Jin-Hwe Kweon, Jae-Woo Jung, Tae-Hwan Kim, Jin-Ho Choi, Dong-Hyun Kim, Failure of carbon composite-to-aluminum joints with combined mechanical fastening and adhesive bonding *Composite Structures*, 75:192–198. 2006.

55. Franco G.D., Inzerillo M., Zuccarello B., Na experimental study of GFRP-aluminium bolted-bonded joints. ECCM15 - 15TH EUROPEAN CONFERENCE ON COMPOSITE MATERIALS, Venice, Italy, 24-28 June. 2012.
56. Gómez S., Oñoro J., Pecharromán J., A simple mechanical model of a structural hybrid adhesive/riveted single lap joint. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 27:263–267. 2007.
57. Geiss P.L., Koetter M.P., Presser M., Raudonat D., Hybrid joining with pressure sensitive adhesives University of Kaiserslautern, Faculty Mechanical and Process Engineering, Workgroup Materials and Surface Technologies (AWOK), 67663 Kaiserslautern, Germany. 2008.
58. Pereira P.H.R., Faria G.C.V., da Silva A.D., Pertence A.E.M., Campos H.B., Cetlin P.R., Influência dos parâmetros geométricos da junta de Clinching na resistência ao desbotoamento entre as chapas. Departamento de Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Minas Gerais – Av. Antônio Carlos, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil, 6627:31270-901. 2013.
59. Neto J.A.B.P., Campilho R.D.S.G., da Silva L.F.M., Parametric study of adhesive joints with composites. *Int. J. Adhes. Adhes.*, 37:96–101. 2012.
60. Campilho R.D.S.G., Banea M.D., Neto J.A.B.P., Silva L.F.M., Modelling adhesive joints with cohesive zone models: effect of the cohesive law shape of the adhesive layer. *Int. J. Adhes. Adhes.*, 88:513-533. 2013.
61. Darwish S.M.H., Ghanya A. Critical assessment of weld-bonded technologies. *J Mater Process Technol.*, 105:221–9. 2000.
62. Santos I.O., Zhang W., Gonçalves V.M., Bay N., Martins P.A.F. Weld bonding of stainless steel. *Int J Mach Tool Manuf.*, 44:1431–9. 2004.
63. Faneco T.M.S., Caracterização das propriedades mecânicas de um adesivo estrutural de alta ductilidade. Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica – Ramo de Materiais e Tecnologias de Fabrico. Instituto Superior de Engenharia do Porto. 2014.

64. Chang B., Shi Y., Dong S., *Journal of Materials Processing Technology*, 100:171-178. 2000.
65. Campilho R.D.S.G., de Moura M.F.S.F., Domingues J.J.M.S., Using a cohesive damage model to predict the tensile behaviour of CFRP single-strap repairs. *Int. J. Solids Struct.*, 45:1497-1512. 2008.
66. Pocius A.V., *Adhesion and Adhesives Technology, An Introduction*, 2nd Edition. Hanser, 83:311 – 319. 2002.
67. Campilho R.D.S.G., *Modelação da Execução de Reparações em Materiais Compósitos*. M.Sc. Thesis. Porto, Portugal: Department of Mechanical Engineering and Industrial Management, Engineering Faculty of Porto University. 2005.
68. Gonçalves J.P.M., Moura M.F.S.F., Magalhães A.G., Castro P.M.S.T., Application of interface finite elements to three-dimensional progressive failure analysis of adhesive joints. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 26:479–86. 2003.
69. Andersson T., Stigh U., The stress-elongation relation for an adhesive layer loaded in peel using equilibrium of energetic forces. *International Journal of Solids and Structures*, 41:413–34. 2004.
70. Leffler K., Alfredsson K.S., Stigh U., Shear behaviour of adhesive layers. *International Journal of Solids and Structures*, 44:530–45. 2007.
71. Hogberg J.L., Stigh U., Specimen proposals for mixed mode testing of adhesive layer. *Engineering Fracture Mechanics*, 73:2541–56. 2006.
72. de Moura M.F.S.F., Campilho R.D.S.G., Gonçalves J.P.M., Crack Equivalent Concept Applied to the Fracture Characterization of Bonded Joints under Pure Mode I Loading. *Composites Science and Technology*, 68:2224-2230. 2008.
73. de Moura M.F.S.F., Campilho R.D.S.G., Gonçalves J.P.M., Pure mode II fracture characterization of composite bonded joints. *International Journal of Solids and Structures*, 46:1589-1595. 2009.

74. Marques E.A.S., Silva L.F.M., Joint strength optimization of adhesively bonded patches. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 84:917–36. 2008.
75. Campilho R.D.S.G., Pinto A.M.G., Banea M.D., Silva R.F., Da Silva L.F.M., Strength improvement of adhesively-bonded joints using a reverse-bent geometry. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 25:2351-2368. 2011.
76. Campilho R.D.S.G., Banea M.D., Pinto A.M.G., Silva L.F.M., de Jesus A.M.P., Strength prediction of single- and double-lap joints by standard and extended finite element modeling. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 31:363-372. 2011.
77. Azevedo J.C.S., Determinação da tenacidade à fractura em tracção (GIIC) de adesivos estruturais pelo ensaio End-Notched Flexure (ENF). Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica – Ramo de Construções Mecânicas. Instituto Superior de Engenharia do Porto. 2014.
78. Campilho R.D.S.G., de Moura M.F.S.F., Domingues J.J.M.S., Numerical prediction on the tensile residual strength of repaired CFRP under different geometric changes. *Int. J. Adhes. Adhes.*, 29:195–205. 2009.
79. Vable M., Maddi J.R., Boundary element analysis of adhesively bonded joints. *Int. J. Adhes. Adhes.*, 26:133-144. 2006.
80. Luo Q., Tong L., Fully-coupled nonlinear analysis of single lap adhesive joints. *Int. J. Solids Struct.*, 44:2349-2370. 2007.
81. Fernandes T.A.B., Aplicação de métodos numéricos avançados para a previsão de resistência de ligações adesivas. Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica – Ramo de Construções Mecânicas. Instituto Superior de Engenharia do Porto. 2014.
82. Adams R.D., Peppiatt N.A., Stress analysis of adhesive-bonded lap joints. *J Strain Anal.*, 9:185–196. 1974.
83. da Silva L.F.M., Öchsner A., Adams R.D. (eds.), *Handbook of Adhesion Technology*. Springer, Heidelberg. 2011.